



***Facultad
de
Ciencias***

**MODELADO DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES
MEDIANTE LA EXPLOTACIÓN DE DATOS
ABIERTOS GEOESPACIALES: *BACCHARIS
HALIMIFOLIA***

**(Species distribution modelling by exploiting
geospatial open data: *Baccharis halimifolia*)**

**Trabajo de Fin de Grado
para acceder al**

GRADO EN FÍSICA

Autor: Inés Delgado Fernández

Director: Jesús Marco de Lucas

Co-Director: Fernando Aguilar Gómez

Diciembre – 2019

Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a Jesús Marco de Lucas por haber propuesto un tema tan interesante e importante, haciendo ver que las aplicaciones de la física son muchas y muy diversas y haciendo hincapié en un problema global al que todos nos enfrentamos: el cambio climático, que es en realidad una lucha contra las consecuencias de los actos despreocupados que el ser humano ha realizado en las últimas décadas. También por haberme puesto en contacto con Fernando Aguilar, a quien me gustaría agradecer el seguimiento, el apoyo y la ayuda durante el proceso de realización del trabajo. Muchas gracias también a Daniel García, quien también me ha ayudado y apoyado en cualquier problema y dificultad que hubiera tenido. Habéis hecho de este camino, duro, por un lado, un acercamiento agradable a una disciplina poco conocida para mí al principio, logrando atraerme lo suficiente como para considerar seguir formándome en ella en un futuro. Muchas gracias también a Francisco Pando por sus anotaciones y por haberme propuesto, entre otras, la especie protagonista del trabajo.

Me siento muy agradecida de haber pasado una buena etapa realizando este Grado en Física, y de cerrarla con un proyecto con el que me siento orgullosa por todo el trabajo y el tiempo invertidos, a lo largo de todas las vicisitudes del proceso. Si bien es cierto que me he sentido muy agobiada en algunos momentos, también guiada, apoyada y motivada en muchos otros.

Muchas gracias a los profesores que me han dado clase que, además de haberme formado en las diversas materias de la física, en matemáticas y en programación, también lo han hecho en diferentes habilidades que me han ayudado a desarrollarme como persona y me hacen sentir un poco más preparada para enfrentarme a todo lo que me depara el futuro a partir de... ¡ya!

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se pretende realizar un estudio sobre biodiversidad, en el cual la física es una disciplina aplicada. Se ha realizado un estudio sobre la predicción de la distribución de probabilidad de presencia en Europa de *Baccharis halimifolia*, una especie de arbusto invasor, frente un escenario de cambio climático. Para ello se ha hecho uso de variables obtenidas por satélites obtenidas a partir de la radiación reflejada por la superficie de la Tierra, variables climáticas como la temperatura y la precipitación y ocurrencias de la especie georreferenciadas. Tras realizar una curación de los datos iniciales se realizó un primer modelo con el programa Maxent con las ocurrencias previas a 2005 para validarlo con las coordenadas posteriores a 2005. El modelo resultó ser muy bueno, con un AUC (área bajo la curva) = 0.946, un valor muy cercano a 1. Por tanto, se realizó un modelo de cambio climático, proyectando las capas medioambientales con las condiciones actuales sobre las capas medioambientales modificadas por las predicciones de cambio climático en el año 2100 aproximadamente. Se observó que la distribución de probabilidad variaba, disminuyendo ligeramente la probabilidad de presencia en el sur y aumentando sobre todo en la costa sur de las Islas Británicas. Sin embargo, se observa un riesgo en la expansión de la especie a lo largo de la costa cantábrica si no se toman las medidas necesarias de prevención y erradicación.

Palabras clave: Biodiversidad, Satélite, Sentinel 2, Machine Learning, Máxima Entropía, Nicho Ecológico, *Baccharis halimifolia*, Cambio Climático

Abstract

This Final Degree Project aims to perform a biodiversity study, where physics is an applied discipline. A study about the prediction of the probability distribution of presence of the species *Baccharis halimifolia*, an invasive brush, in Europe, facing a climate change scenario has been made. For it, variables obtained from satellites, from the reflexed light by the Earth surface, climate variables such as temperature and precipitation and the georeferenced species occurrences. After a data curation, a first model was made with the software Maxent with the before 2005 occurrences, in order to validate it with the after 2005 occurrences. The model was very good, with a AUC (Area Under the Curve) = 0.946, very close to 1. Therefore, a climate change model was made, projecting the environmental layers con the actual conditions on the modified climate change environmental layers, approximately in 2100. It was observed that the probability distribution varied. The probability of presence decreased slightly in the south and increased especially in the south costs of the British Islands. Nevertheless, a risk of expansion of the species has been noticed along the cantabrian coast, if the needed measures of prevention and eradication are not taken.

Key words: Biodiversity, Satellite, Sentinel-2, Machine Learning, Maximum Entropy, Ecological Niche, *Baccharis halimifolia*, Climate Change

Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Justificación y motivación	2
1.2.	Objetivos	4
1.3.	Especies invasoras	5
1.4.	La chilca (<i>Baccharis halimifolia</i>).....	6
2.	Herramientas y datos	8
2.1.	Teledetección	8
2.2.	Google Earth Engine	14
2.3.	QGIS	14
2.4.	Modelado: Maxent	14
2.5.	GBIF.....	17
3.	Procedimiento experimental.....	18
3.1.	Descarga y curación de los datos	18
3.2.	Selección de las capas.....	20
3.3.	Calibración y validación del modelo	22
3.4.	Predicción en un escenario de cambio climático	22
4.	Resultados y análisis.....	23
4.1.	Modelación y validación	24
4.2.	Predicción en escenario de cambio climático	26
5.	Discusión y conclusión.....	30
	Referencias.....	32
	Apéndices	37
	Apéndice 1	37

Índice de Figuras

Figura 1. Fotografía de <i>Baccharis halimifolia</i> en estado silvestre	6
Figura 2. Configuración orbital de los dos satélites que componen el SENTINEL-2	10
Figura 3. Satélite Sentinel-2, interior del MSI compuesto por los espejos y los FPAs	10
Figura 4. Comparación del Landsat 7 y 8 con el Sentinel-2.....	11
Figura 5. Curva ROC	16
Figura 6. Entorno de desarrollo Spyder	18
Figura 7. Ejemplo de ocurrencias fuera de las capas medioambientales	19
Figura 8. Imagen por satélite del índice NDVI.	19
Figura 9. Zona de estudio descartada, norte de la Península Ibérica.	23
Figura 10. Zona de estudio Europa.	24
Figura 11. Distribución de probabilidad de presencia, modelo de validación	25
Figura 12. Curva ROC del modelo de validación.....	26
Figura 13. Modelos predictivos con las condiciones actuales.....	28
Figura 14. Modelo predictivo ante un cambio climático	29

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de las bandas del espectro de los satélites Sentinel-2A y el 2B.....	9
Tabla 2. Índices satélite, descripción y obtención	12
Tabla 3. Variables climáticas, elevación y agua con su descripción y unidades	13
Tabla 4. Capas y sus contribuciones e importancia en el primer filtrado.	20
Tabla 5. Capas finalmente seleccionadas.....	21
Tabla 6. Distribución probabilidad en la validación.....	25
Tabla 7. Variables climáticas y variación por cambio climático.....	27

1. Introducción

Los seres humanos han sobrevivido gracias a la naturaleza y a lo que esta les ha ofrecido durante miles de años. Durante todo ese tiempo ha habido momentos de *revolución tecnológica* o *revolución científico-técnica* que desembocaban en desarrollos de nuevas tecnologías, lo que se conoce como *evolución tecnológica*. Todos los inventos y desarrollos tecnológicos se han realizado con el objetivo de facilitar la cobertura de las necesidades esenciales del ser humano y, posteriormente, para satisfacer sus deseos y obtener placeres. Esta evolución ha sucedido muy paulatinamente, desde que se creó el primer invento hasta la *Revolución industrial*, donde la evolución pasó a tener un ritmo mucho más elevado. A partir de la Segunda Guerra Mundial la evolución se acelera considerablemente: descubrimientos, inventos y tecnologías cada vez surgían en tiempos más cortos. El ritmo de la evolución tecnológica se ha incrementado exponencialmente hasta el día de hoy. [68]

Por tanto, la mayor parte de la población humana es, actualmente, tecnológica. Ha relegado a la naturaleza a un pasatiempo por la lejanía de las grandes ciudades y vive con más comodidades y una calidad de vida mayor que hace no muchos años atrás. El ser humano ya no está en sincronía con la naturaleza pues cree que no le hace falta para sobrevivir. La globalización, la explotación de los recursos naturales y la modificación del medio para construir edificios o zonas dedicadas a agricultura y ganadería son varias *consecuencias* de la expansión de la raza humana, el crecimiento de su población y el modelo económico predominante en el mundo; también son las principales *causas* de pérdida de biodiversidad. Es evidente que a lo largo de la historia de la vida en la Tierra se han extinguido especies de manera continua, pero desde que el ser humano ha modificado el medio como ningún otro ser vivo antes, se ha multiplicado por 100 el ritmo de extinción de especies [1]. Por ejemplo, desde el año 1500 se ha favorecido la extinción de 680 especies de vertebrados [2]. Además, el número de especies en peligro de extinción es de aproximadamente un millón de los ocho millones de especies que habitan en la Tierra, muchas de ellas en las últimas décadas [2].

La biodiversidad es el conjunto de seres vivos que se encuentran en el medio ambiente [3]. A pesar de la percepción de que el ser humano no necesita la existencia del resto de los seres vivos (menos los utilizados en ganadería y piscifactoría, entre otros) para sobrevivir, la realidad es todo lo contrario. El valor de la biodiversidad no se puede cuantificar de manera sencilla pues no tiene un interés económico en el mercado, tan sólo ecológico. Los perjuicios que causa la pérdida de biodiversidad para las personas afectan al bienestar, la salud alimentaria, los desastres naturales, la seguridad energética, el acceso a agua limpia, etc [1]. El impacto humano sobre el medio ambiente, o *influencia antropogénica*, generalmente supone un beneficio a una o varias personas, mientras que las poblaciones en vías de desarrollo o poblados indígenas de la zona son los que más sufren las consecuencias por tener menor capacidad de adaptación.

Se debe señalar que la pérdida de biodiversidad se compone de más aspectos que el aumento en el ritmo de extinción de especies y el gran número de especies en peligro de extinción. También forma parte de ello el cambio climático, la actividad humana en el uso de los suelos y el hecho de que ha aumentado el número de especies que se pueden encontrar en varios lugares del planeta a bastante distancia entre ellos. Esta es una de las causas de la globalización y puede causar la implantación de especies exóticas en zonas donde se pueden convertir en invasoras. Este trabajo se centra en una especie invasora en concreto, pero se quiere resaltar la importancia de este problema a nivel global.

Otro de los aspectos que se pretende tratar en este trabajo es el impacto del cambio climático acelerado debido al calentamiento global, en esta especie en concreto. El cambio climático forma parte de un cambio global, entre otros cambios ambientales causados por la actividad humana. Es muy complicado realizar predicciones sobre la evolución de este cambio debido a las interacciones entre sistemas biofísicos y estos con la sociedad [4].

A lo largo de la historia de la Tierra se han sucedido, uno tras otro, cambios globales que involucraban cambios climáticos, lo que a primera vista parece un dato tranquilizador. No obstante, hay ciertas características que hacen que este cambio climático sea único. Al igual que ocurría con la pérdida de biodiversidad, el tiempo en que han ocurrido eventos clave en el desarrollo de este cambio global (como el aumento de la producción de CO_2) ha sido muy corto, tan solo de décadas, por tanto, la rapidez ha sido considerable. Otra de las características que hacen único este cambio global es que ha sido propiciado por una única especie: el ser humano u *Homo Sapiens*. Ha sido tal el impacto de la actividad humana sobre el medio que, en el año 2000, Paul Crutzen, químico atmosférico y ganador de un premio nobel, y E. Stoermer propusieron el término *Antropoceno* para nombrar la etapa de la historia del planeta que se está viviendo actualmente [4].

Dentro de la tecnología actual se encuentran los satélites, que permiten obtener datos medioambientales a gran escala relacionados con la orografía, la hidrografía, la vegetación, la meteorología, los incendios, erupciones volcánicas, etc. Esta es una tecnología que se está usando y se utiliza en este trabajo, gracias a los satélites Sentinel 2 del programa Copernicus, de la Agencia Espacial Europea (ESA: European Space Agency), para realizar modelos actuales y predictivos relacionados con la biodiversidad.

En este primer apartado se van a presentar la motivación y la justificación del tema de este trabajo, así como los objetivos que se pretenden conseguir. También se expondrá información teórica importante para el trabajo, tanto con respecto a la especie que se va a estudiar como con respecto al estado en que se encuentran actualmente las técnicas utilizadas.

1.1. Justificación y motivación

La Física es una rama del conocimiento, una “ciencia, que estudia las propiedades de la materia y de la energía y las relaciones entre ambas”, según la RAE [5]. Se trata de una definición que no hace justicia a su magnitud ya que lo que se pretende con la física es entender el mundo real y poder obtener patrones de comportamiento en forma de leyes, reglas y teorías con el fin de poder predecir los fenómenos que ocurren en la naturaleza. De esta manera, lo que la física busca, en cualquiera de sus disciplinas, es el conocimiento.

Se podría decir que la física es la base de todas las demás ciencias, pues sus ámbitos son los conocimientos sobre los que se cimentan otras ciencias o tecnologías: mecánica y relatividad, termodinámica, física estadística, óptica, electromagnetismo, acústica, mecánica de fluidos, mecánica cuántica, física nuclear, molecular y de partículas, astrofísica, etc. Muchas de estas disciplinas se encuentran dentro de otras o tienen mucha relación entre ellas, pues en muchas ocasiones depende de las dimensiones de las magnitudes con las que se está tratando.

De esta manera, cuando la física se aplica a otros campos se forman nuevas áreas de conocimiento, como la biofísica, diferentes ingenierías, física computacional, biotecnología, geofísica, física de la atmósfera, medio ambiente, física médica... entre otras. Por lo tanto, son multidisciplinares, pudiendo converger dos o más áreas de conocimiento.

En este caso el área principal de este trabajo es el medio ambiente. Más concretamente, se trata de un estudio sobre biodiversidad en el que se utiliza un área de las matemáticas, la estadística, para obtener los resultados y analizarlos, haciendo uso de conocimientos sobre la especie del estudio y su hábitat. La estadística también se puede aplicar a otros campos para desarrollar modelos que expliquen ciertos patrones: termodinámica, física cuántica, demografía, sociología, economía, biología, medicina... También se debe tener en cuenta que la mayoría de los datos utilizados tienen origen físico, más concretamente, óptico. Teniendo en cuenta las características de los instrumentos ópticos de los satélites utilizados para obtener los datos, se destacan las partes del espectro de reflexión de la Tierra necesarias para obtener diferente información.

El tema de este trabajo se propuso por investigadores del CSIC, del Real Jardín Botánico. La motivación principal es estudiar el ecosistema ideal para una especie exótica invasora, predominantemente en la zona norte de la península, con el objetivo de conocer las áreas potenciales de habitabilidad para proceder a la eliminación de los especímenes y evitar una mayor expansión. Asimismo, otra de las motivaciones es estudiar el modelo del ecosistema situado unos años en el futuro, teniendo en cuenta las modificaciones en las variables climáticas que están teniendo lugar debido al cambio climático.

Las especies exóticas invasoras, como ya se ha presentado anteriormente, constituyen uno de los mayores problemas en cuanto a pérdida de biodiversidad. La especie escogida se denomina *Baccharis halimifolia* y es una planta que presenta ciertos problemas en los ecosistemas que invade. Como todas las especies invasoras, supone una competición por el espacio y los recursos con otras especies que pueden tener una función similar en el ecosistema.

El hábitat de origen de esta especie, en Norteamérica, consta de comunidades de flora en condiciones de salinidad (zonas halófilas) e inundación intermedias en estuarios y zonas entre dunas y marismas y zonas húmedas post-dunares. En Norteamérica compite con otros arbustos por el espacio que soportan condiciones similares a la chilca. En el caso de la costa cantábrica, en las zonas menos halófilas, compite principalmente con el sauce ceniciento, *Salix atrocinerea*, y puntualmente con el aliso, *Alnus glutinosa*. De esta manera, apenas encuentra competición en las zonas más salinas, más cercanas a la costa, pero se estas dos especies competidoras previenen su expansión hacia el interior en zonas altas de marisma. Sin embargo, no existen arbustos autóctonos que le puedan hacer frente en otros ecosistemas como juncales subhalófilos poblados por *Juncus maritimus*, herbazales halonitrófilos de *Elytrigia atherica*, que son considerados Hábitats de Interés Comunitario. También se ven afectados carrizales subhalófilos (planicies inundables) habitados por *Phragmites australis* y otro tipo de juncales situados en depresiones arenosas poblados por *Juncus acutus*. Sin embargo, se ha observado que la marisma inferior, más cercana al mar, con unas condiciones de salinidad e inundación bastante más elevadas, es un hábitat que no favorece la supervivencia ni la reproducción de la chilca. En Gipuzkoa y Francia ha ocupado zonas de acantilados costeros, invadiendo hábitats que se consideran “prioritarios” según la Directiva Hábitat 92/43/CEE: los brezales costeros aerohalinos habitados por *Erica vagans* y *Ulex gallii* y zonas halocasmofíticas de la alianza *Crithmo-Armerion*. La chilca está invadiendo Espacios Naturales Protegidos como el estuario de Tina Mayor en Asturias, en todos los estuarios protegidos de Cantabria y País Vasco, aunque en muchos de los casos se han tomado y se están tomando medidas para eliminarla. [69]

Además, muestra una adaptabilidad al medio muy considerable, pues es capaz de soportar diferentes niveles de salinidad del suelo, pero sí se ha observado que cuanto más se acerca al nivel de salinidad del mar, experimental una disminución de su tamaño, así como en la

producción de semillas. [69] También posee una gran resistencia a su eliminación en la etapa adulta. También es difícil de erradicar debido a su manera de reproducirse, que se expondrá más adelante. Otros de los inconvenientes de esta planta es que puede resultar tóxica si se ingiere en ciertas cantidades por animales rumiantes y además es alergógena para los humanos por su gran producción de polen.

Esta especie es originaria de América del Norte y en España se encuentra en el Catálogo de Especies Exóticas Invasoras. Además, se encuentra en la lista de especies preocupantes para la Unión Europea, ya que también ha invadido ecosistemas en otros países: Francia, Bélgica y Reino Unido. También se puede encontrar en países de Oceanía (Nueva Zelanda y Australia) donde también se encuentra como especie exótica invasora.

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es caracterizar o modelar la distribución de probabilidad de presencia de la chilca a lo largo del territorio de estudio, con el objetivo de localizar los puntos que pueden ser afectados, tanto en la actualidad como en un futuro donde las condiciones climáticas han cambiado por el cambio climático. De esta manera se pretende con ello evitar la pérdida de biodiversidad, en este caso, en las zonas de estuarios y marismas.

El objetivo se encuentra englobado y muy relacionado con la infraestructura de investigación denominada *LifeWatch ERIC* (European Research Infrastructure Consortium), creado el 17 de marzo de 2017, cuya sede se encuentra en Sevilla, España. Es el proyecto que mejor se ajusta a este trabajo, pudiendo servir este de ayuda en sus investigaciones. En el momento de su creación formaban parte los siguientes países: Bélgica, Grecia, España, Italia, los Países Bajos, Portugal, Rumanía y Eslovenia. [6]

Se trata de una iniciativa cuya misión es abordar los problemas globales a los que hacer frente por medio de investigaciones científicas sobre biodiversidad que provean a la comunidad científica de información que facilite la comprensión de la biodiversidad y los ecosistemas. Una vez se tiene la información suficiente y se comprende el problema, se debe analizar para saber cómo poder actuar. [7] Para ello, LifeWatch ERIC proporciona una infraestructura basada en tecnología, desde la cual se pretende apoyar a los científicos en su labor a través de recursos computacionales, capacidad de almacenamiento y gestión de datos y la adaptación de diversas tecnologías y herramientas para ser aplicadas en estudios de biodiversidad o ecología.

El objetivo final es prevenir la pérdida de biodiversidad, teniendo en cuenta las causas relacionadas con el medio ambiente y el cambio climático que la provocan. La comunidad de LifeWatch en España está formada por científicos de diferentes organizaciones e instituciones: en noviembre de 2018 estaba formado por 30 diferentes, entre los que se encuentran, entre otros, el Instituto de Física de Cantabria (IFCA), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Instituto Español de Oceanografía. [6]

Este objetivo se encuentra también dentro de los Objetivos y metas de Desarrollo Sostenible (ODS), un conjunto de objetivos globales que los líderes mundiales crearon el 25 de septiembre de 2015 como parte de una *agenda de desarrollo sostenible*, con una serie de metas que se esperan alcanzar en el año 2030. Se trata de 17 objetivos y cada uno está relacionado con un tema en concreto, como la igualdad de género, el fin de la pobreza o producción y consumo responsables. [8]

Este trabajo se encuentra relacionado con varios de estos objetivos. Principalmente se encuentra relacionado con el objetivo 15: Vida de los ecosistemas terrestres, donde se pretende

<< Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad>>. Dentro de las 12 metas de este objetivo, una en concreto se relaciona específicamente con el tema de este trabajo: <<15.8. Para 2020, adoptar medidas para prevenir la introducción de especies exóticas invasoras y reducir de forma significativa sus efectos en los ecosistemas terrestres y acuáticos y controlar o erradicar las especies prioritarias.>> [9]

El objetivo de este trabajo, sobre todo enfocado a la prevención de la pérdida de biodiversidad mediante el estudio de las poblaciones de especies invasoras, también lo persiguen organizaciones gubernamentales, colectivos estatales, asociaciones, etc.; desde a niveles europeos como a niveles comarcales o municipales; desde trabajos de investigación hasta trabajos de campo.

1.3. Especies invasoras

Baccharis halimifolia forma parte del conjunto de Especies Exóticas Invasoras (EEI) en España. La presencia de estas especies es la segunda principal causa de pérdida de biodiversidad no solo en España, sino en el mundo entero.

Publicada en el BOE, la ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, describe a las EEI como *“aquella que se introduce o establece en un ecosistema o hábitat natural o seminatural y que es un agente de cambio y amenaza para la diversidad biológica nativa, ya sea por su comportamiento invasor, o por el riesgo de contaminación genética”*. [10]

Es este caso, esta especie fue introducida en Europa de manera intencionada para adornar jardines como planta ornamental [11], pero las EEI también pueden introducirse de manera accidental a causa del transporte de mercancías o pasajeros. Así, desde que fue traída ha conseguido adaptarse al medio y expandirse. De esta manera, las especies autóctonas, que no han tenido contacto con esta especie exótica, deben competir por primera vez por el espacio en el ecosistema, por lo que muchas veces quedan relegadas a otras zonas alejadas de su hogar, o acaban muriendo y, en algunos casos, extinguiéndose.

Las organizaciones ecologistas afirman que es muy importante la sensibilización de la población sobre las consecuencias de la introducción de especies exóticas en un ecosistema para la prevención de los daños que puedan ocasionar, es decir, no se deben comprar especies de animales, plantas u hongos exóticos ni comercializar con ellos y se debe avisar a las autoridades medioambientales de la comunidad autónoma correspondiente o al propio Ministerio para la Transición Ecológica si se localiza alguna de estas especies. En el caso de especies que ya hayan invadido zonas de los ecosistemas es necesario crear planes de acción para su eliminación y reinstaurar el hábitat autóctono previo a su aparición y colonización. [12]

En el Ministerio para la Transición Ecológica se encuentra disponible un catálogo de las especies exóticas invasoras declaradas en España, así como una pequeña información sobre cada una y zonas donde habitan. Este catálogo fue creado en el artículo 64 de la ley 42/2007, previamente mencionada, y se incluyen las especies que se considera que cumplen con la definición de *especie exótica invasora*. Este catálogo puede ser modificado en el caso de que se encuentren nuevas EEI, como sucedió con el Real Decreto 216/2019, de 29 de marzo, donde se añadieron especies de fauna y flora en el territorio de las Islas Canarias. Este catálogo puede obtenerse completo o por grupos taxonómicos: hongos, algas, flora, invertebrados no

artrópodos, artrópodos no crustáceos, crustáceos, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos. [13]

La Unión Europea tomó parte en el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), el primer acuerdo global en el que se tratan asuntos relacionados con la biodiversidad, firmado en 1992 y puesto en vigor en el 1993. Como parte del Convenio, se expone que «impedirá que se introduzcan, controlará o erradicará las especies exóticas que amenacen a ecosistemas, hábitats o especies». También se puso en vigor el Reglamento (UE) nº 1143/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2014, sobre la prevención y la gestión de la introducción y propagación de especies exóticas invasoras, donde se exponen normas que deben poner en práctica los países miembros con el objetivo de prevenir, reducir y revertir los daños provocados por las especies invasoras sobre las demás especies del ecosistema afectado, el impacto social y económico, y sobre la seguridad y la salud.

La UE también tiene una lista de especies exóticas invasoras preocupantes, publicada en el «REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2016/1141 DE LA COMISIÓN de 13 de julio de 2016 por el que se adopta una lista de especies exóticas invasoras preocupantes para la Unión de conformidad con el Reglamento (UE) nº 1143/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo». En esta lista también se encuentra *Baccharis halimifolia*, afirmando que estas y las demás especies de la lista, cumplen los requisitos expuestos en Reglamento (UE) nº 1143/2014 previamente mencionado. [14]

1.4. La chilca (*Baccharis halimifolia*)

Esta especie de planta se conoce vulgarmente como *chilca*, *bácaris* o *carqueja*. Es originaria de la costa este de América del Norte. El origen de la presencia de esta en Europa es, probablemente, su introducción como planta ornamental. La primera referencia es en París en 1683. Posteriormente se ha referenciado su presencia asilvestrada en Las Landas en 1803 y en Bayona-Anglet en 1918. No es necesario mencionar que el hecho de no haber referencias no significa que no haya presencia. No obstante, se menciona porque precisamente este es uno de los grandes obstáculos en estudios sobre biodiversidad [11].



Figura 1. Fotografía de *Baccharis halimifolia* en estado silvestre. Se pueden observar las florecencias en ramilletes y su forma de arbusto. [15]

A pesar de haber sido citado en España por primera vez en 1941 (en Lequeitio, Vizcaya), la primera referencia que se tiene en la base de datos utilizada es de 1950, procedente de la base de datos del Instituto Botánico de Barcelona, en la Ría de Oyambre, Cantabria [40]. Existen referencias anteriores, pero sin tener coordenadas asociadas: en 1949 en Requejada, Cantabria, registrado por el Real Jardín Botánico del CSIC [41], en 1785 en Gorbea (aunque este lugar no es seguro), Álava, procedente de la base de datos del Herbarium de plantas vasculares del Museo de Historia Natural de Álava, siendo este registro uno de los dos históricos que poseen, registrado por Lorenzo Prestamero.

Esta planta ha logrado estar presente en prácticamente todos los estuarios de la costa cantábrica desde País Vasco, pasando por Cantabria hasta Galicia. También hay algunas referencias en Madrid, procedentes de Jardín Botánico y otras en Cataluña.

Baccharis halimifolia es un arbusto caducifolio con una altura entre 1 y 4 metros. Desde la base puede presentar un único tallo, pudiendo llegar a ser un árbol, o puede estar ramificado. El tronco es de color marrón y puede llegar a un diámetro de 25 cm y sus hojas son de forma elíptica y son gruesas de color entre verde brillante y gris con una longitud de 2 a 6 cm. Posee unas inflorescencias en forma de racimos de color blanco y sus raíces tienden a crecer lateralmente.

La chilca tiene un crecimiento rápido, de entre 30 y 40 cm al año. Su producción de semillas es muy significativa, siendo una de las plantas registradas más productora. Se puede reproducir de dos formas: de forma vegetativa por sus raíces, es decir, las raíces se propagan y pueden dar lugar a otro ejemplar a partir de estas (reproducción asexual), creando cúmulos de esta especie en cada zona que haya un solo ejemplar; y de manera sexual, por medio de las semillas que previamente se han comentado. Las semillas pierden rápidamente su capacidad reproductiva, por otro lado, como ya se ha comentado, la planta genera una cantidad ingente de semillas, las cuales se puede propagar por el viento, pudiendo llegar a su destino final y hacer germinar un nuevo ejemplar o depositarse en una zona de agua como mares, ríos, lagos, donde también son propagados hacia otras zonas.

Otros factores que favorece su propagación son la poca propensión de los animales herbívoros a alimentarse de ella, ya que su *palatabilidad* ("cualidad de ser grato al paladar un alimento"[16]) es muy baja; su alta capacidad de recuperación por rebrote tras los incendios; su poca exigencia a suelos pobre en nitrógeno y fósforo, (las plantas necesitan N para formar compuestos orgánicos importantes como aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos y el P es utilizado por las plantas en procesos metabólicos [17]) es bastante tolerante con suelos con niveles elevados de salinidad; también resiste períodos no muy largos de inundaciones.

Además de ser perjudicial por ser una especie exótica invasora, es alergógena por su gran producción de polen.

Como se ha introducido, esta planta se encuentra en zonas costeras del Cantábrico, por lo que una de las razones por las cuales se encuentra en el "Top 20 de especies exóticas invasoras más dañinas en España" es por su capacidad de retener sedimentos por medio de sus raíces. Esto hace que los ejemplares que se encuentran en marismas y estuarios provocan que estas cada vez se encuentren más colmatadas, más rellenas de sedimento, siendo un riesgo para la integridad del ecosistema. Esto afecta a todos los seres vivos que habitan en ellos, tanto a la flora como a la fauna, obligando, en el caso de la fauna, a desplazarse a otras zonas que se asemejen más a su hábitat natural. [11]

La chilca puede resultar peligroso para ciertos herbívoros, hecho que puede resultar contradictorio con su baja palatabilidad. De hecho, esta planta cuando no se encuentra en fase de floración, posee unas hojas muy verdes y vistosas para los animales, que se alimentan de ellas cuando el pasto o el forraje no es abundante. Cuando estos animales se alimentan de las hojas de la chilca se pueden ver envenenados por una sustancia que contienen. Esta sustancia es un glucósido cardiotóxico, cuyo envenenamiento produce sobre todo convulsiones y diarrea y no existe ningún antídoto. Por tanto, se deben usar tratamientos como sedantes para el primero y protectores estomacales para el segundo. Sin embargo, ni en España ni en Francia se ha reportado ningún caso. [18]

A pesar de que la mejor acción que se puede tomar es la preventiva, se están llevando a cabo diversas tareas para lograr eliminar los ejemplares donde ya se encuentran establecidos. Se ha descartado la quema por los motivos ya mencionados y, sobre todo, porque puede favorecer a la planta eliminando a las especies autóctonas a las que está menguando su zona habitable. Existen métodos mecánicos como la poda y el desbroce que no son muy eficaces, una vez más, por la gran capacidad de rebrote de esta especie. Sin embargo, la roza, una técnica agrícola que consiste en podar hasta dejar solamente la raíz, ha resultado satisfactoria en el caso de plantas de chilca jóvenes, pues sus raíces se encuentran poco desarrolladas en profundidad, pudiendo extraerse de la tierra. [11]

2. Herramientas y datos

Para lograr los objetivos que se han descrito anteriormente se han utilizado diferentes conjuntos de datos y herramientas de acceso abierto a lo largo del proyecto, que se van a presentar en este apartado. En ambos casos son de acceso abierto, por lo que se encuentran al alcance de cualquier persona con acceso a Internet. Sin embargo, la explotación de estos recursos requiere de ciertas habilidades técnicas.

2.1. Teledetección

La teledetección es el proceso de medición de diferentes magnitudes de la superficie o la atmósfera de la Tierra mediante el uso de datos tomados mediante satélites o aeronaves. Debido a que se trata de datos obtenidos a distancia, los datos se obtienen a partir de ondas ópticas o acústicas. En este caso las ondas utilizadas son de tipo óptico. Gracias a los satélites que incorporan sistemas específicos para teledetección se pueden tomar datos en forma de imágenes de las zonas de la Tierra que el sistema de detección barre a medida que el satélite orbita en torno a la Tierra. La teledetección tiene muchas aplicaciones. Entre ellas se encuentran la monitorización del medio ambiente, la agricultura, la exploración de recursos no renovables y renovables, la meteorología, la cartografía y topografía y para fines militares e informativos. [19]

Las imágenes por satélite utilizadas provienen del satélite Copernicus SENTINEL-2, construido por Astrium, división espacial del grupo Airbus. Este satélite tiene una misión encomendada por la ESA (European Space Agency: Agencia Espacial Europea) llamada Copernicus, previamente conocido como “Global Monitoring for Environment and Security” (GMES). Este programa tiene como objetivo mejorar la gestión del medio ambiente, gestión de los suelos, la agricultura y la silvicultura, controlar desastres, ayudar a las operaciones de ayuda humanitaria, realizar mapeo de riesgos, entender y mitigar los efectos del cambio climático, y asegurar la seguridad ciudadana.

El SENTINEL-2 consta de una constelación de dos satélites en órbita polar situados en la misma órbita heliosíncrona, con 180° de fase entre ambos. Su función es monitorear la variabilidad de las condiciones de la superficie de la Tierra. Tiene un ancho de franja de 290 km y un tiempo de revisión de 10 días en el ecuador (5 con dos satélites) y 2-3 días en latitudes medias (contando con que no haya nubes). [20] El primer satélite, el Sentinel-2^a, fue lanzado y puesto en órbita el 23 de junio de 2015 y el segundo satélite, el Sentinel-2B, el 7 de marzo de 2017, ambos desde la Guyana Francesa. Estos satélites fueron diseñados con una gran autonomía, pudiendo operar sin recibir ninguna instrucción hasta 15 días. [23]

El SENTINEL-2 lleva incorporado un instrumento óptico de franja ancha, alta resolución y multispectral denominado MultiSpectral Instrument, MSI. Tiene la capacidad de muestrear 13 bandas espectrales que cubren un rango de longitudes de onda de 443 nm–2190 nm: cuatro bandas con una resolución espacial de 10 m (espectro visible e infrarrojo cercano), seis bandas de 20 m (espectro infrarrojo de onda corta y “red-edge”) y tres bandas de 60 m (bandas de corrección atmosférica). El “red-edge” o “borde rojo” se refiere a la zona del espectro donde se produce un ascenso muy rápido en la reflectancia de la vegetación en el infrarrojo cercano y este satélite es el primero de sus características en tener tres bandas en el “red edge”. [21]

En la siguiente tabla se pueden observar las características de las bandas brevemente descritas en el párrafo anterior, diferenciando entre el satélite Sentinel-2A y el 2B.

	S2A		S2B		
Número de banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución espacial (m)
1	442.7	21	442.2	21	60
2	492.4	66	492.1	66	10
3	559.8	36	559.0	36	10
4	664.6	31	664.9	31	10
5	704.1	15	703.8	16	20
6	740.5	15	739.1	15	20
7	782.8	20	779.7	20	20
8	832.8	106	832.9	106	10
8 ^a	864.7	21	864.0	22	20
9	945.1	20	943.2	21	60
10	1373.5	31	1376.9	30	60
11	1613.7	91	1610.4	94	20
12	2202.4	175	2185.7	185	20

Tabla 1. Se muestra la longitud de onda central y el ancho de banda, ambos en nm, para cada una de las 13 bandas en cada uno de los MSI de cada satélite. El ancho de banda está medido en la anchura a media altura (FWHM: Full Width Half Maximum). [24]

Se pueden observar ciertas diferencias en las características de detección de ambos MSI. Sin embargo, uno puede estar seguro de su coherencia debido a que la calibración radiométrica se realiza cada dos semanas o cada mes y la calibración geométrica cada año [37]. Además, teniendo en cuenta el ancho de banda, en ambos casos la longitud de onda central se encuentra en el ancho de banda de ambos y la diferencia entre la longitud de onda en los picos es muy pequeña. Se puede observar que la resolución espacial es la misma en ambos casos.

En la Figura 2 se puede observar un dibujo de la configuración orbital de los satélites:

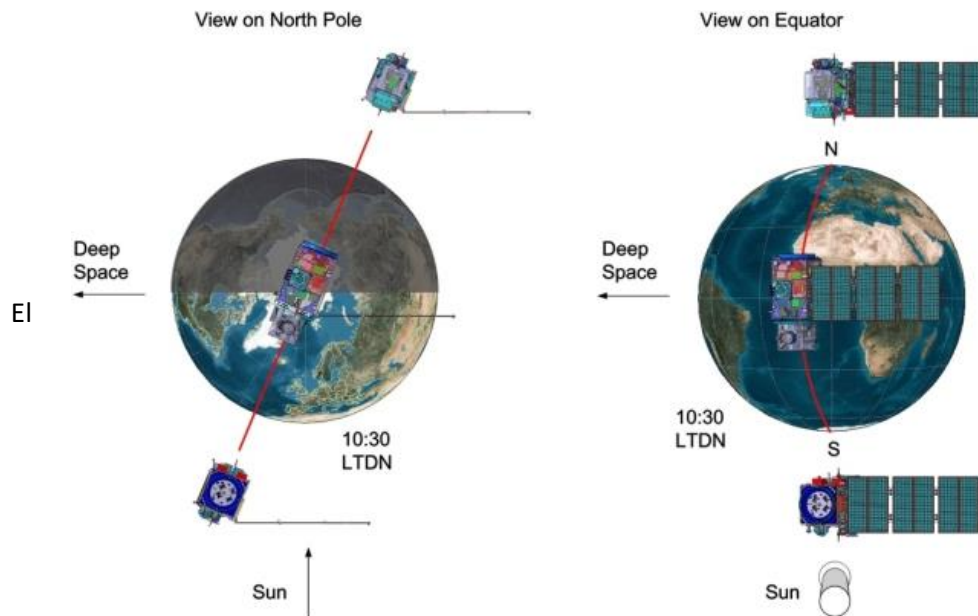


Figura 2. Configuración orbital de los dos satélites que componen el SENTINEL-2 (cortesía de Astrium GmbH). [27]

funcionamiento del MSI se basa en el barrido de superficies. Este instrumento tiene un sensor que, a medida que el satélite recorre su órbita, va obteniendo conjuntos de datos de imagen de distintas superficies de la Tierra. El instrumento recibe la luz reflejada por la Tierra y su atmósfera a través de un telescopio de tres espejos y lo enfoca mediante un divisor de haz en dos Conjuntos de Plano Focal (FPAs: Focal Plane Assemblies), uno para las diez longitudes de onda visibles e infrarrojo cercano (VNIR: Visible and near-infrared) y el otro para las tres longitudes infrarrojas de onda corta (SWIR: Short-wave infrared). [26]

En la siguiente Figura se puede apreciar un dibujo del satélite Sentinel-2:

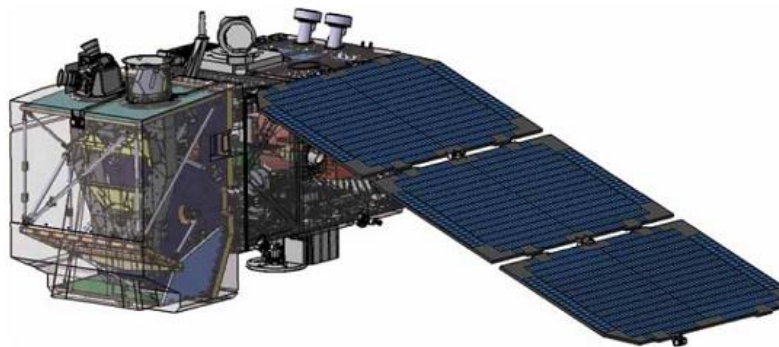


Figura 3. Dibujo del satélite Sentinel-2, donde se puede intuir en su interior el MSI compuesto por los espejos y los FPAs. [28]

Como ya se ha mencionado previamente, el ancho de franja del sensor óptico (esto es el ancho de una superficie en la Tierra que puede detectar en un instante). Esto se consigue debido a que los FPAs están compuestos de doce detectores cada uno, suponiendo un total de 450 000 píxeles. Si los datos correspondientes a ciertos píxeles se pierden, estos son reemplazados por valores recurrentes en la zona donde se haya tomado la imagen. Los detectores poseen unos filtros de gran calidad con el objetivo de separar las bandas espectrales exitosamente.

Debido a la disposición de estos detectores, existe un desfase en la observación del suelo entre las diferentes bandas. El mayor desfase ocurre entre las bandas B09 y B02, con un desfase

de 2.586 segundos, seguido del desfase entre la B01 y la B02 con 2.314 segundos de desfase. El menor desfase ocurre entre las bandas B12 y B8a, con 0.030 segundos de desfase. Los desfases entre las demás bandas se encuentran entre estos tiempos.

En la siguiente Figura se muestra la distribución de las bandas de los MSI del Sentinel 2 con respecto a otros satélites con otros instrumentos multispectrales, sobre la espectrografía de la transmisión de luz desde la Tierra a través de la atmósfera:

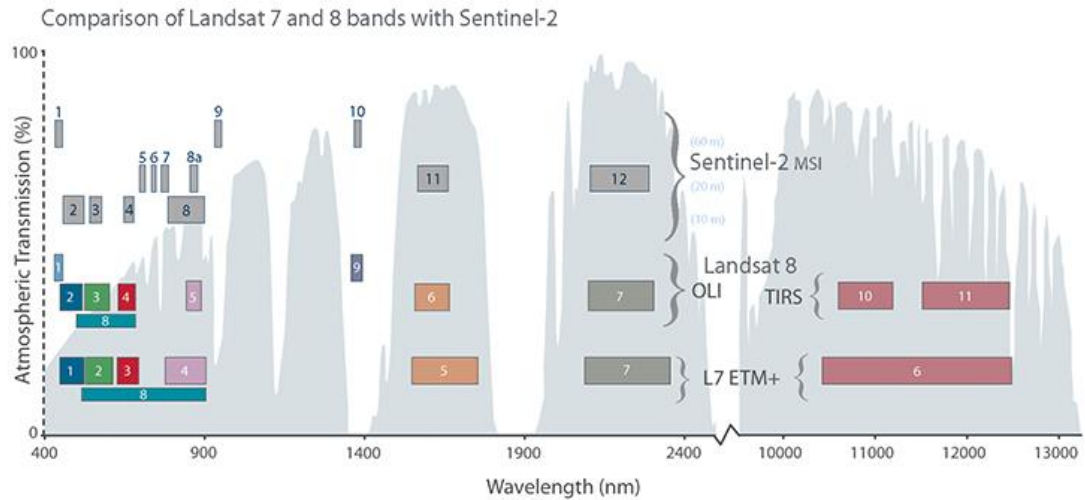


Figura 4. Comparación del Landsat 7 y 8 con el Sentinel-2. Se entiende de manera visual los datos expuestos en la Tabla 1 sobre las longitudes de onda centrales y los anchos de banda. [25]

Índices satélite

Con el objetivo de crear un modelo de la distribución territorial de la especie escogida lo más correcto posible, se necesitan un conjunto de datos denominados índices vegetación, suelo o agua que aportan información sobre la frondosidad de un bosque, áreas incendiadas, presencia o no de agua en forma de lagos, ríos, riachuelos... Existen muchos índices diferentes, unos tendrán más influencia que otros en el modelo, pero cada uno hace alusión a un aspecto diferente en el terreno. Las expresiones que se van a presentar posteriormente tienen una base física, ya que se basan en reflexiones de la luz sobre la superficie de la Tierra. Los satélites miden valores discretos de la radiación reflejada por la superficie de la Tierra a lo largo del espectro electromagnético, de manera que los índices se basan en la relación de estas medidas del espectro electromagnético, que se denominan bandas. Haciendo uso de estas bandas del MSI de los satélites Sentinel-2 presentados en la Figura 3, se pueden obtener los índices para el área de estudio del trabajo.

En la siguiente Tabla se muestran las variables obtenidas.

Índice	Descripción	Obtención a partir de bandas
ARI1	Anthocyanin Reflectance Index 1	$1 / B03 - 1 / B05$
ARI2	Anthocyanin Reflectance Index 2	$B08 / B02 - B08 / B03$
ARVI	Atmospherically Resistant Vegetation Index	$(B09 - B04 - 0.106 * (B04 - B02)) / (B09 + B04 - 0.106 * (B04 - B02))$
BAI	Burn Area Index	$1 / (0.1 - B04^2) + (0.06 - B08^2)$
CHL	Chlorophyll Red-Edge	$B05 / B08$
CRI1	Carotenoid Reflectance Index 1	$1 / B02 - 1 / B03$
CRI2	Carotenoid Reflectance Index 2	$1 / B02 - 1 / B05$
EVI	Enhanced Vegetation Index	$2.5 * (B08 - B04) / (B08 + 6 * B04 - 7.5 * B02 + 1)$
EVI2	Enhanced Vegetation Index 2	$2.4 * (B08 - B04) / (B08 + B04 + 1)$
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	$(B08 - B03) / (B08 + B03)$
GRVI1	Green-Red Vegetation Index 1	$(B04 - B03) / (B04 + B03)$
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	$B05 - B04 - 0.2 * (B05 - B03) * (B05 / B04)$
mNDVI705	Modified red-edge normalized difference vegetation index	$(B06 - B05) / (B06 + B05 - 2 * B01)$
MNDWI	Modified NDWI	$(B03 - B11) / (B03 + B11)$
MSI	Moisture Stress Index	$B11 / B08$
MSR705	Modified Simple Ratio 705	$(B06 - B01) / (B05 - B01)$
MTCI	MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	$(B06 - B05) / (B05 - B04)$
NBR	Normalized Burn Ratio	$(B08 - B12) / (B08 + B12)$
NDBI	Normalized Difference Built Index	$(B11 - B08) / (B11 + B08)$
NDI45	Normalized Difference Index 45	$(B05 - B04) / (B05 + B04)$
NDII	Normalized Difference Infrared Index	$(B08 - B11) / (B08 + B11)$
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(B08 - B04) / (B08 + B04)$
NDVI705	Red Edge NDVI 705	$(B06 - B05) / (B06 + B05)$
NDVIG	Normalized difference vegetation index-green	$B03 * (B08 - B04) / (B08 + B04)$
NDWI	Normalized Difference Water Index	$(B08 - B11) / (B08 + B11)$
PSRI	Plant Senescence Reflectance Index	$(B04 - B02) / B05$
PSRINIR	Plant Senescence Reflectance Index–Near Infrared	$(B04 - B02) / B08$
REDNDVI	Red Edge Normalized Vegetation Index	$(B08 - B06) / (B08 + B06)$
RENDWI	Red-Edge Normalized Difference Water Index	$(B03 - B05) / (B03 + B05)$
S2REP	Sentinel-2 Red-Edge Position	$705 + 35 * (0.5 * (B07 + B04) - B05) / (B06 - B05)$
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	$(B08 - B04) * (1 + 0.428) / (B08 + B04 + 0.428)$
SIPI	Structure Intensive Pigment Index	$(B08 - B01) / (B08 - B04)$
SR	Simple Ratio	$B08 / B04$

Tabla 2. Se presentan 33 índices y su forma de obtenerlos mediante las imágenes captadas de una misma zona por diferentes detectores (y, por tanto, diferentes bandas del espectro electromagnético según la Tabla 1) del MSI [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48].

Se ha usado la base de datos de los satélites Sentinel-2 denominada *Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A* [55]. El nivel 2A del Sentinel-2 incluye una corrección atmosférica aplicada a la parte superior de la atmósfera, por tanto, las imágenes obtenidas con él tienen una corrección en la reflectancia y están referidas a la parte baja de la atmósfera [63].

Otras variables

Los índices son unas variables importantes para realizar distribuciones de probabilidad de presencia de la especie, pero también lo son otras como la elevación del terreno o las variables climáticas de temperatura y precipitación. Las variables climáticas de temperatura y precipitación se han obtenido de la base de datos llamada *WorldClim BIO Variables V1*, con una resolución de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km). Estas variables se obtienen a partir de valores de temperatura y precipitación mensuales, de manera que tienen una mayor importancia biológica y por lo que son utilizadas habitualmente para estudios sobre modelado de distribución de especies, como es el caso [35].

Para la elevación se ha usado la base de datos llamada *GTOPO30: Global 30 Arc-Second Elevation*, también con una resolución de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km) [38]. Para la variable *water* se ha usado una base de datos llamada *GLCF: Landsat Global Inland Water* [56].

Variable	Unidades	Significado
elevation	m	Elevación
bio01	°C	Temperatura media anual
bio02	°C	Rango diurno medio (media de cada mes (máx. temp. – mín. temp.))
bio03	%	Isotermalidad (bio02/bio07)
bio04	°C	Estacionalidad de temperatura (Desviación estándar * 100)
bio05	°C	Máxima temperatura del mes más cálido
bio06	°C	Mínima temperatura del mes más frío
bio07	°C	Rango anual de temperatura (bio05-bio06)
bio08	°C	Temperatura media del trimestre más húmedo
bio09	°C	Temperatura media del trimestre más seco
bio10	°C	Temperatura media del trimestre más cálido
bio11	°C	Temperatura media del trimestre más frío
bio12	mm	Precipitación anual
bio13	mm	Precipitación del mes más húmedo
bio14	mm	Precipitación del mes más seco
bio15	Coef. variación	Estacionalidad de precipitación
bio16	mm	Precipitación del trimestre más húmedo
bio17	mm	Precipitación del trimestre más seco
bio18	mm	Precipitación del trimestre más cálido
bio19	mm	Precipitación del trimestre más frío
water	-	Cuerpos de agua interiores (ríos, lagos de agua dulce o salada, embalses...)

Tabla 3. En la primera columna se expone el nombre de las bandas que se habían de seleccionar para obtener las imágenes correspondientes a cada una de ellas, como en el caso de los índices de la Tabla 2. En la segunda columna se indican las unidades en las que

2.2. Google Earth Engine

Para la obtención de los índices presentados en las Tablas 2 y 3 se ha hecho uso de la herramienta *Google Earth Engine*. Earth Engine es una plataforma impulsada por Google cuyo objetivo es poner a disposición de organizaciones sin ánimo de lucro, organismos públicos, estudiantes, centros de investigación, empresas, etc. grandes volúmenes de datos en forma de imágenes por satélite para su posterior visualización y análisis. El historial de estas imágenes llega hasta hace más de cuarenta años y las bases de datos de imágenes se actualizan diariamente.

Google Earth Engine además ofrece a los usuarios herramientas y APIs (Application Programming Interface: Interfaz de Programación de Aplicaciones) para el análisis de los diferentes conjuntos de datos obtenidos a partir de las imágenes.

El *Earth Engine Code Editor* es un IDE web (Integrated Development Environment: Entorno de Desarrollo Integrado) que ha sido utilizado para este trabajo realizando diversos scripts de código con el fin de obtener imágenes en formato GEOTIFF de los diferentes índices de vegetación y de variables climáticas en la zona interesada. [30]

En el Anexo 1 se muestra el ejemplo de parte del código utilizado, así como los comentarios pertinentes para su correcta comprensión.

2.3. QGIS

QGIS es un Sistema de Información Geográfica, SIG, programa informático dedicado a la gestión de datos geospaciales que sirven para los trabajos en ciencias de la tierra y el medio ambiente en mayor parte [39]. Este software se ha utilizado para la visualización de los puntos geográficos de las ocurrencias de la base de datos, sobre un mapa base del mundo. También se ha utilizado para la conversión de las imágenes obtenidas a través de Google Earth Engine del formato GEOTIFF a ASC. [31]

2.4. Modelado: Maxent

Maxent es un software de código abierto utilizado para modelar nichos y distribuciones de especies mediante la aplicación de una técnica de aprendizaje automático (machine learning) llamada "Modelo de máxima entropía". Es decir, con un conjunto de datos medioambientales (datos climáticos, por ejemplo) y ocurrencias georreferenciadas de una especie, el modelo genera una distribución de probabilidad donde a cada celda del mapa se le asigna de manera predictiva una idoneidad de condiciones para esta especie. Los datos de entrada pueden ser interpretados bajo ciertos supuestos, pudiendo ser interpretado el resultado como la probabilidad de presencia predicha (transformación cloglog) o la abundancia local predicha (salida exponencial en bruto). [32]

Actualmente, debido a la gran cantidad de datos de ocurrencias sobre especies de flora y fauna en todo el mundo, así como en datos climáticos e índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes por satélite, se ha propiciado el aumento de estudios sobre biodiversidad y los nichos ecológicos de ciertas especies, esto es la distribución espacial de una especie en un ecosistema. Estos estudios son interesantes sobre todo cuando se trata de dos condiciones: que la especie se encuentre en peligro de extinción o que sea una especie invasora. En ambos casos se trata un problema global que es la pérdida de biodiversidad. Es evidente que mediante un análisis probabilístico de predicción no se pueden tener en cuenta todas las influencias externas

que afectan a una determinada especie; sobre todo si estas influencias son consecuencia de la acción humana sobre el medio, muchas veces poco predecible.

Estos estudios se pueden realizar tanto con ocurrencias de “presencia” como con ocurrencias de “ausencia”. No obstante, la mayoría de los estudios se realizan con ocurrencias de presencia, como es este caso de *Baccharis halimifolia*, debido a que es más complicado determinar ocurrencias de ‘no presencia’ o ausencia y, por tanto, son bastante más escasas.

Puesto que este software se utiliza para obtener *nichos ecológicos* de las especies que se estén estudiando, es importante conocer la diferencia entre *nicho fundamental* y *nicho realizado*. El *nicho fundamental*, también denominado *nicho potencial*, consiste en el conjunto de condiciones que deben darse para que la especie pueda sobrevivir a medio-largo plazo. El *nicho realizado*, también denominado *nicho real* o *nicho efectivo*, es una parte del nicho fundamental que realmente ocupa la especie cuando se ve influida por las relaciones con otras especies que conviven en el mismo medio, por la presencia humana, la orografía, etc. Por tanto, las condiciones que se dan en los puntos geográficos donde se han referenciado especímenes, forman parte del nicho realizado, es decir, son *ejemplos* o *muestras* de este. Por tanto, el modelo basado en nichos en el que Maxent está basado es una aproximación del nicho realizado real. El nicho fundamental es simplemente una construcción teórica y cuya diferencia con el nicho realizado resulta desconocida. Se debe tener en cuenta que el nicho no es un área. Es un concepto abstracto compuesto de conjuntos de datos que, posteriormente, se proyectan sobre un mapa, siendo la *distribución potencial de la especie* aquella área en que se cumplen las condiciones del nicho. [34]

Dos resultados bastante importantes que proporciona Maxent al realizar los modelos, son la curva ROC (Característica Operativa del Receptor) y el AUC (Área Bajo la Curva). La curva ROC representa gráficamente el ratio de verdaderos positivos (VPR = Razón de Verdaderos Positivos) frente al ratio de falsos positivos (FPR = Razón de Falsos Positivos) [64]. De esta manera hay una línea recta $x = y$ (recta de pendiente = 1, de color negro en la *Figura 5*) que indica una predicción aleatoria, es decir, una tasa de acierto del 50 %. Por tanto, para poder afirmar que el modelo ha entrenado con los datos de entrenamiento y es útil para predecir, la curva ROC debe situarse por encima de esa línea recta, esto significa ser mejor que el azar. Si se encontrara por debajo significaría que el modelo es peor que un modelo aleatorio y si se encuentra a la altura de la recta significaría que el modelo es equiparable al azar.

El modelo será mejor cuanto mayor sea el área bajo la curva, pues se encontrará más alejada de la recta de modelo aleatorio, y cuanto más arriba se encuentre, es decir, cuando más se acerque al máximo valor en el eje Y, 1, como se puede observar en la siguiente Figura:

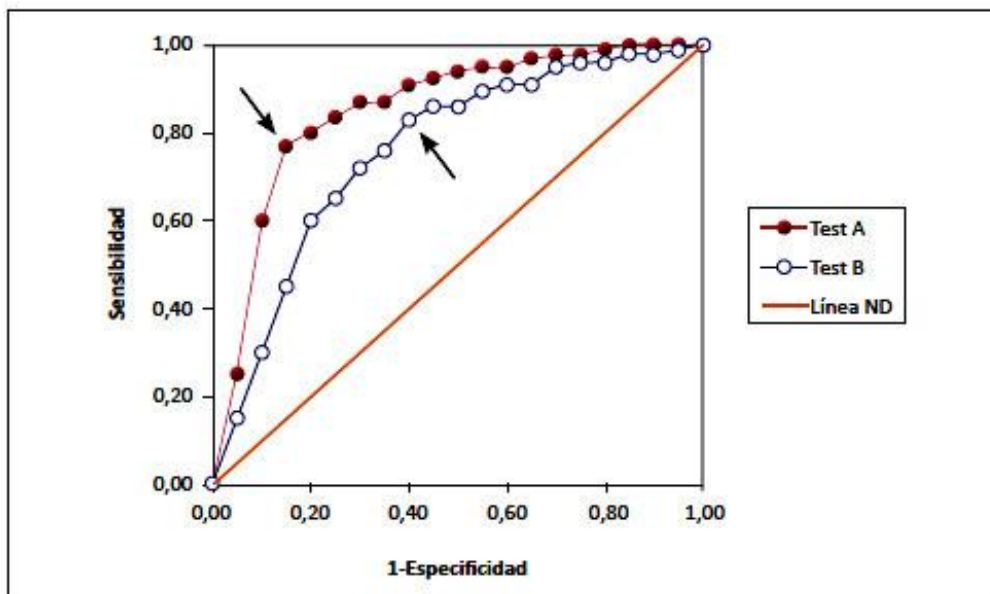


Figura 5. Gráfica en la que se representa la curva ROC de un modelo de validación. Si se hubieran utilizado los mismos datos en el Test A y el B, ambas curvas serían idénticas. La curva ROC roja tiene un valor de AUC ligeramente mayor que la azul, debido a que está relacionada con los datos de entrenamiento con los cuales se ha realizado el ajuste del modelo. Cuanto más cercano a 1 se encuentre el AUC de la curva ROC azul, mejor se considera que es el modelo para predecir la distribución de probabilidad del conjunto de datos de test. [66]

Un apunte que se debe tener en cuenta es que los valores del AUC serán mayores para los casos en que no se disponga de un número elevado de ocurrencias, en comparación con el área que se está estudiando y en el que se aplican las capas medioambientales. Pero esto no significa que sean buenos modelos, sino que se trata de un comportamiento artificial de las estadísticas de las AUC, sobreajustando el modelo en las zonas localizadas de las ocurrencias [32].

Principio de máxima entropía

Siempre que se pretende realizar una aproximación de una distribución de probabilidad desconocida, se quiere la mejor estimación. Según E.T. Jaynes, el mejor enfoque es aquel que asegure que la aproximación satisface cualquier restricción de la distribución no conocida que se está estudiando y que, sujeta a estas restricciones, la distribución debería tener máxima entropía. Esto es conocido como el principio de máxima entropía [60]. Se recuerda la definición de entropía: es una expresión cuantitativa que representa el grado de desorden o aleatoriedad en un sistema termodinámico, o la cantidad de energía que no se encuentra disponible para producir trabajo. [61]

En este caso la distribución de probabilidad desconocida, que se denota con π , se trata de la función de distribución de probabilidad de presencia de la especie *Baccharis halimifolia* sobre un área geográfica, un conjunto X , que se interpretará como el conjunto de píxeles del área de estudio, siendo cada píxel un elemento individual del conjunto que se denominará *punto*. De esta manera la distribución de probabilidad π asignará a cada punto x de X una probabilidad no negativa $\pi(x)$, de tal manera que la suma de todas las probabilidades sea 1. El objetivo es obtener una aproximación de esta distribución de probabilidad, siendo la aproximación a su vez otra distribución de probabilidad $\hat{\pi}$. La entropía de una distribución de probabilidad se define de la siguiente manera según la mecánica estadística:

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x),$$

siendo \ln el logaritmo neperiano. La entropía nunca es negativa y su valor mínimo es el logaritmo neperiano del número de elementos de X . En este caso la entropía representaría la medida de cuántas opciones están inmersas en la selección de un evento [62]. Teniendo en cuenta esta definición, una distribución de probabilidad con mayor entropía supone un mayor número de opciones posibles y, por tanto, con menos restricciones.

La distribución de probabilidad que se obtiene con Maxent es de tipo distribución de Gibbs, también llamada ‘distribución de Boltzmann’. Sigue la siguiente ecuación:

$$q_{\lambda} = \frac{e^{\lambda \cdot f(x)}}{Z_{\lambda}}$$

El resultado que se va a obtener es una distribución de probabilidad proyectada en un mapa, por lo que cada punto, del mapa tendrá una probabilidad de presencia para la especie estudiada dependiendo de los valores de cada una de las capas medioambientales que se han seleccionado. De esta manera, cada punto tendrá un valor cuyo rango irá desde 0: nula probabilidad de presencia, hasta 1: una probabilidad segura de presencia, que se representará con una escala de colores para que resulte más visual.

2.5. GBIF

Las ocurrencias, es decir, los datos de cada una de las referencias de un ejemplar de chilca catalogado se han obtenido a través de la base de datos de biodiversidad GBIF. Se trata de una gran base de datos de biodiversidad online libre y de acceso abierto. En palabras de la propia plataforma, GBIF (Global Biodiversity Information Facility) es una infraestructura de investigación y una red internacional que se encuentra financiado por los gobiernos de diferentes países cuyo objetivo es proveer a cualquier persona, desde cualquier lugar, un acceso abierto a datos sobre todo tipo de vida en la Tierra. [29]

Una vez en la sección sobre la especie en concreto que se quiere estudiar, en este caso *Baccharis halimifolia*, se puede hacer un filtrado de datos previo a la descarga del conjunto de datos. En este caso se han seleccionado las ocurrencias que se encuentren dentro de Europa. Se puede descargar el conjunto de datos resultante en un archivo .csv.

Una vez realizado el filtrado de todos los datos que son correctos dentro de la región de estudio se observa que se tiene a disposición un conjunto de 705 ocurrencias. En el procedimiento experimental se dividen en dos partes: ocurrencias con fecha anterior a 2005 (203 ocurrencias) y ocurrencias con fecha posterior a 2005 (489). También se tiene un conjunto de ocurrencias sin fechas que no se utilizarán en la validación, pero sí en la predicción de cambio climático (103). Se puede observar que los últimos tres valores no suman el valor de todas las ocurrencias. Esto se debe a que muchas de las ocurrencias se encuentran repetidas en los diferentes conjuntos de datos.

3. Procedimiento experimental

El procedimiento seguido se ha dividido en las siguientes fases:

3.1. Descarga y curación de los datos

Primero se ha realizado una recogida de datos, entre los que se encuentran los puntos geográficos, las fechas de las ocurrencias, etc. de la especie *Baccharis halimifolia* desde la plataforma de GBIF y las imágenes obtenidas por satélite, representando diversos índices o variables climáticas como la temperatura o la precipitación, desde Google Earth Engine.

En el caso de las ocurrencias de la especie, una vez descargado el conjunto de datos dado en un archivo de formato .csv, se ha procedido al análisis y curación de los datos. Primero, se han eliminado los valores duplicados en cada uno de los conjuntos de datos que se han introducido en el apartado 2.1.4. Como ya se ha adelantado, uno de los obstáculos en estudios sobre biodiversidad es, precisamente, las ocurrencias o, mejor dicho, la falta de ellas. Es decir, el hecho de que no se tengan referencias de una especie en ciertos lugares no significa que no exista. Es por ello por lo que posteriormente se ha realizado un conjunto de datos nuevos, analizando las coordenadas y las fechas, deduciendo si una ocurrencia puede estar varios años antes o después de haber sido referenciada.

Este análisis se ha realizado con el lenguaje de programación Python utilizando el paquete Pandas, específico para trabajar con bases y conjuntos de datos. Se ha usado el entorno de desarrollo Spyder, como se puede observar en la siguiente Figura:

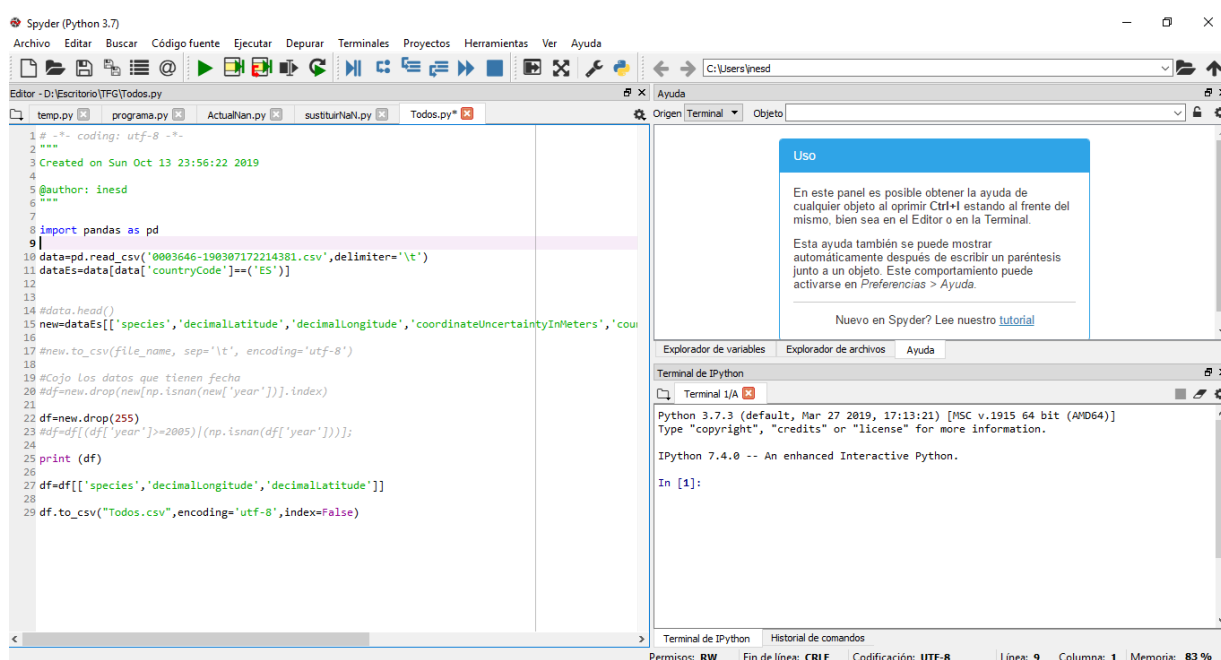


Figura 6. La imagen muestra el entorno de desarrollo Spyder, en el cual se han creado diferentes scripts, pudiéndose ejecutar desde esta misma ventana pulsando el icono de “play” o desde la ventana de comandos de Windows.

El siguiente paso de curación de datos se debió a que algunas de las coordenadas geográficas de las ocurrencias se encontraban fuera del área de estudio o fuera del área donde las capas ambientales poseían datos no nulos. El motivo de esta situación se debía a la cercanía al mar de estas ocurrencias, debido a que en el área marítima no existen datos de variables bioclimáticas y medioambientales. Para resolver este problema se ha movido cada punto al área con datos más cercano, como se puede observar en la siguiente Figura, con QGIS:

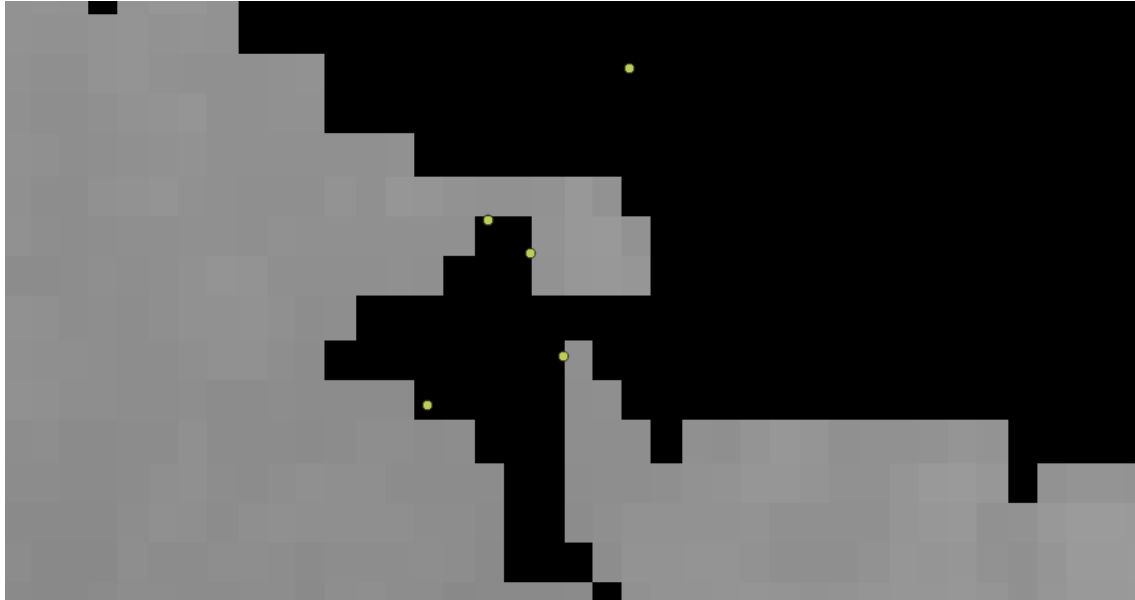


Figura 7. Coordenadas en la zona de Santona-Laredo fuera del área de las capas medioambientales.

A continuación, las imágenes obtenidas a través de Google Earth Engine se han convertido de formato con el Sistema de Información Geográfica QGIS, como ya se ha adelantado, del formato .tif al formato .asc. Esta conversión se realiza porque el programa de Maxent lee las capas medioambientales solamente en este formato. Se ha dado un valor de –999999999 a los puntos que no tuvieran datos. En la siguiente Figura se muestra el ejemplo de una de las imágenes tomadas por satélite:

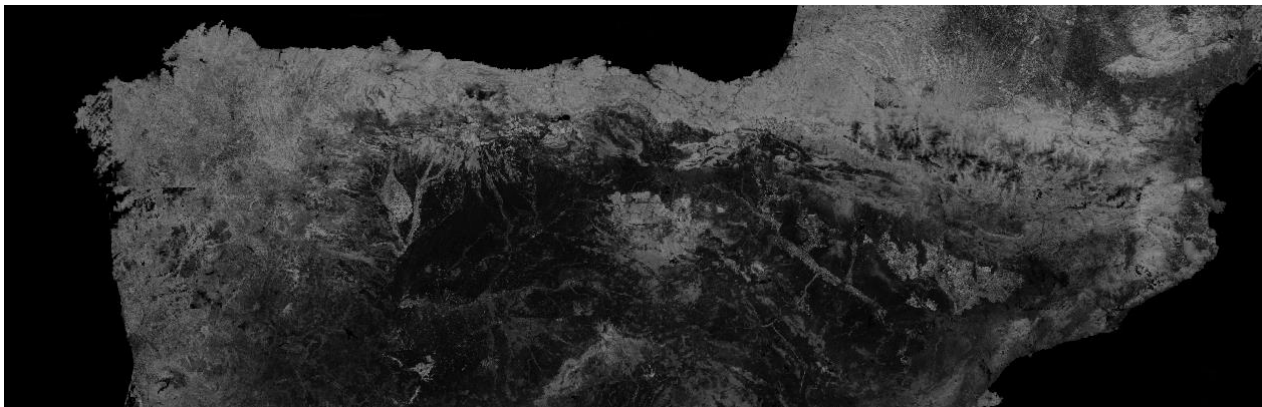


Figura 8. Representación del índice NDVI, índice de vegetación de diferencia normalizada en paleta de grises, en el norte de la Península Ibérica.

Algunas de estas capas tenían dimensiones diferentes, por lo que se han tomado las capas de mayor dimensión y se ha realizado un ‘Recorte por extensión’ tomando como referencia una de las capas de dimensión más pequeña, también con QGIS. También se ha modificado el valor de referencia de esquina (xllcorner, yllcorner) para que fuera el mismo en todas las capas, para evitar errores de dimensiones en Maxent.

El último paso ha sido sustituir todos los valores NaN (Not a Number) presentes en las capas medioambientales (sólo había valores NaN en estas capas) y sustituirlos por el valor dado en la conversión de las capas de .tif a .asc a los puntos que no tuvieran ningún valor: -999999999, con un programa de Python.

3.2. Selección de las capas

Una vez realizada la curación de los datos, mediante la utilización de Maxent se ha realizado un primer modelo de prueba para observar cuáles son las variables que tienen mayor importancia en el modelo. Estas variables son las presentadas en el apartado 2.1.: los índices satélite de la Tabla 2 y las variables bioclimáticas de la Tabla 3.

Se ha obtenido la siguiente Tabla:

Variable	Percent contribution	Permutation importance
Elevacion	21	0.8
TemperatureannualrangesinNan	18	33.7
MintemperatureofcoldestmonthsinNan	15	1.9
PrecipitationofdriestquartersinNan	9.8	0
PrecipitationseasonalitysinNan	8.9	40
PrecipitationofwarmestquartersinNan	8.3	0
TemperatureseasonalitysinNan	6.7	1.1
MeantemperatureofcoldestquartersinNan	5.1	0
MeandiurnalrangesinNan	1.6	0.2
MNDWI	1.1	0
MeantemperatureofthedriestquartersinNan	0.9	18.6
AnnualPrecipitationsinNan	0.7	0
S2REP	0.6	0.3
ARI2	0.5	0.1
NDI45	0.4	0
RENDWI	0.3	0.1
ARVI	0.3	0.1
water	0.3	0
PrecipitationofcoldestquartersinNan	0.2	2.5
redNDVI	0.1	0.4
MCARI	0.1	0
anualMeanTsinNan	0	0
MeantemperatureofwettestquartersinNan	0	0

Tabla 4. En la primera columna se muestra en nombre de las capas medioambientales e índices de satélite. En la segunda columna se muestra el porcentaje de contribución en el modelo. En la última columna se observa el porcentaje de importancia en el modelo, que se obtiene observando cuánto varía el modelo si se omite esa variable. Se muestran solamente las variables con mayor contribución e importancia, según Maxent.

El criterio de selección que se ha seguido se ha basado en los siguientes puntos:

- Primera columna de la Tabla 4: Contribución en el modelo
- Segunda columna de la Tabla 4: Importancia en el modelo
- Redundancia entre capas, tanto de índices como medioambientales
- Mayor importancia de las capas medioambientales de la Tabla 3 frente a los índices de la Tabla 2

Según el archivo de salida que proporciona Maxent, se han descartado la mayoría de las variables que no habían tenido ninguna contribución en la realización del modelo, ni tampoco tenían ninguna importancia en este, es decir, con la ausencia de estas variables el resultado prácticamente no variaría. Sin embargo, se han conservado algunas de las variables, las bioclimáticas de la tabla 4, debido a una mayor importancia en estudios de distribución de probabilidad de especies frente a las imágenes de índices de satélite. Posteriormente se ha hecho un segundo filtrado con el mismo criterio. Se ha repetido la operación dos veces, para escoger las variables definitivas. En este caso se han escogido 4 variables de índices de satélite, 8 variables bioclimáticas y la elevación.

Así, con estos criterios, las capas que finalmente se han seleccionado han sido las siguientes:

Variable
Elevation
Mintemperatureofcoldestmonthsinnan
Meantemperatureofcoldestquartersinnan
Meantemperatureofthewarmestquartersinnan
Precipitationofcoldestquartersinnan
MNDWI
Maxtemperatureofwarmestmonthsinnan
annualMeanTinnan
Precipitationofwarmestquartersinnan
RENDWI
redNDVI
ARI2
annualPrecipitationsinnan

Tabla 5. Lista de las variables que finalmente se han seleccionado para la validación del modelo y la predicción de cambio climático.

Se considera que las variables medioambientales son fáciles de identificar. Los índices de vegetación que se han escogido son los siguientes:

- MNDWI: Modified Normalized Difference Water Index: Se trata de un índice parecido al NDWI, pero en lugar se usar la banda cercana al infrarrojo (NIR), utiliza la banda MIR (infrarrojo medio).
- REDNDWI: Red-Edge Normalized Difference Water Index: Al igual que en el índice anterior, se trata de un índice similar al NDWI, sustituyendo la banda cercana al infrarrojo (NIR) por la banda de ‘borde rojo’.
- redNDVI: Red Edge Normalized Difference Vegetation Index: Se trata de un índice similar al NDVI, sustituyendo la banda del rojo por la banda de ‘borde rojo’. Este estima la cantidad, la calidad y el desarrollo de la vegetación.
- ARI2: Anthocyanin Reflectance Index 2: Es una modificación del índice ARI1. ARI2 detecta grandes concentraciones de antocianinas [66], pigmentos hidrosolubles que se encuentran en las células vegetales que otorgan a las hojas, flores y frutos colores rojos, púrpuras o azules.

En el caso de las variables bioclimáticas, se han escogido aquellas que no son susceptibles de variar mucho de unas zonas a otras, para evitar obtener un modelo muy localizado. Por lo tanto, también se han escogido variables que no sean redundantes entre sí para una mayor fiabilidad de los datos y, además, que se escojan entre estas variables aquellas que aporten más información [65]. Este ha sido el criterio que se ha seguido también para los índices, escogiendo los que mayor importancia tenían, con menor o nula correlación entre ellos. De esta manera se evita una distribución de probabilidad demasiado localizada.

3.3. Calibración y validación del modelo

Como ya se había indicado previamente, se ha dividido el conjunto de datos en tres grupos dependiendo de la fecha en que fueron registradas las ocurrencias: previos a 2005, posteriores y durante 2005 y sin fecha. Para la calibración se han tomado los datos previos a 2005 como datos de entrenamiento, para ajustar el modelo. Los datos posteriores a 2005 hasta la actualidad han servido para validar el modelo. En este caso, no se han utilizado los datos sin fecha, puesto que no es seguro que pertenezcan a uno u otro grupo. Además, se tienen suficientes datos con fechas como para poder prescindir de estos datos en la validación. Sin embargo, en el caso de que la validación no fuera buena, se podrían usar los datos sin fecha.

3.4. Predicción en un escenario de cambio climático

Para la predicción se han utilizado todos los datos de los que se disponen, incluidos los datos sin fecha. Se ha realizado un análisis con las condiciones ambientales del caso anterior, proyectándolos sobre unas condiciones ambientales ligeramente diferentes, modificadas por el cambio climático de cara al año 2100 aproximadamente. Las variables climáticas utilizadas se han modificado, incrementando la temperatura y disminuyendo las precipitaciones, basando estas modificaciones en el informe “Clima en España: Pasado, presente y futuro, elaborado por la Red CLIVAR-España”. De esta manera se ha obtenido una distribución de probabilidad en un escenario de calentamiento global.

4. Resultados y análisis

La primera opción valorada fue realizar el trabajo con la zona de norte de la Península Ibérica. Se realizó para esta región la calibración y validación y la predicción frente al cambio climático. Sin embargo, la distribución de probabilidad se encontraba sobreajustada por el pequeño número de datos de entrenamiento y la localización de estos en zonas muy concretas. De esta manera se obtuvo una curva ROC cuyo valor AUC era prácticamente 1. Como ya se comentó, el sobreajuste es uno de los resultados que se pueden obtener cuando el número de ocurrencias con el que se trabaja es muy pequeño (39 datos para el entrenamiento, ocurrencias previas a 2005 y 80 para el testing, para probar cómo de bueno es el modelo, posteriores y durante 2005) y estando, además, localizados en zonas muy concretas. A continuación, se muestra el área de estudio que posteriormente se descartó:



Figura 9. Imagen de la Península Ibérica, estando resaltado el área de estudio en un rectángulo rojo. Las coordenadas que limitan el área resaltada son las siguientes: $[-9.54, 41.02]$, $[3.57, 41.02]$, $[3.57, 43.90]$, $[-9.54, 43.90]$.

Por este motivo se ha realizado un segundo análisis abarcando una zona bastante más amplia, siendo las coordenadas que limitan esta área las siguientes $[-12.58, 41.06]$, $[7.90, 41.06]$, $[7.90, 54.23]$, $[-12.58, 54.23]$. En la siguiente imagen se muestra plasmada en un mapa esta área:

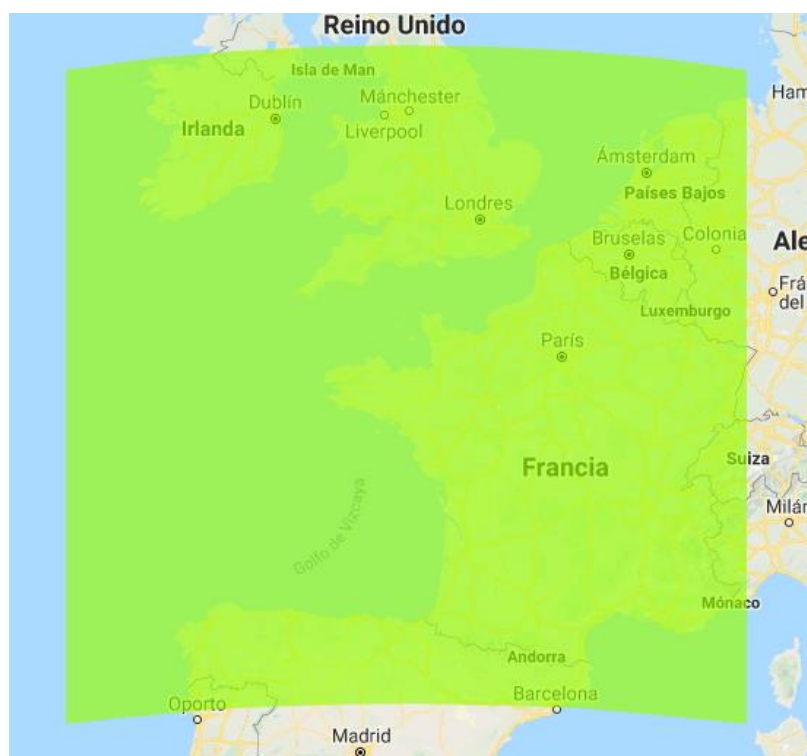


Figura 10. Representación del área ampliada de estudio en color verde sobre un mapa.

4.1. Modelación y validación

Como ya se ha indicado, se ha realizado una primera predicción de la distribución de probabilidad de presencia de la especie *Baccharis halimifolia* con los datos disponibles hasta 2005 como entrenamiento, para después comprobar la eficacia con los datos de 2005 hasta la actualidad disponible. De esta manera se tenían 203 ocurrencias de entrenamiento y 489 de *testing*.

En la siguiente Figura se muestra la distribución de probabilidad para este caso, es decir, la Situación 1 explicada en el apartado anterior.

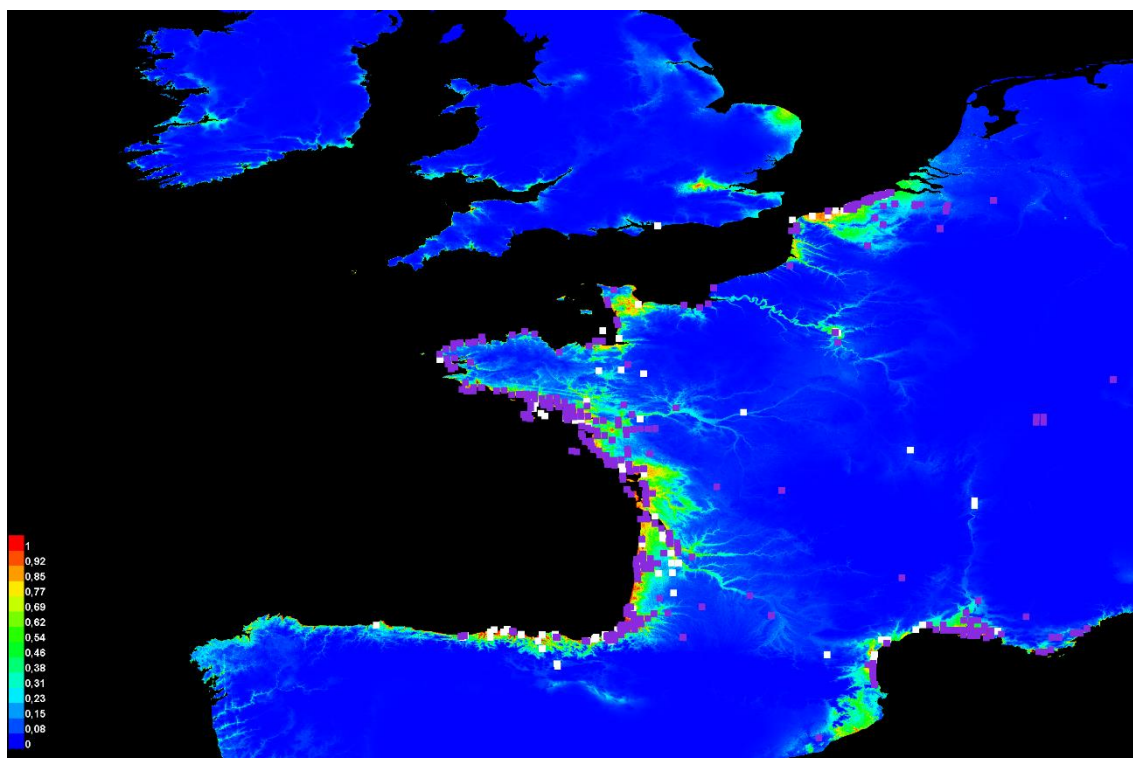


Figura 11. Los colores más fríos como el azul oscuro representan unas condiciones previstas peores, mientras que los colores más cálidos muestran las áreas con unas condiciones más idóneas para la presencia de la especie, es decir, que hay mayor probabilidad de que se encuentre en esas zonas. Los puntos de color blanco representan las ocurrencias previas a 2005. Los puntos de color morado representan las ocurrencias restantes. Abajo a la izquierda se tiene la leyenda de la probabilidad de presencia. El 0 indica una probabilidad nula de presencia debido a las condiciones climáticas mientras que el 1 indica una probabilidad de presencia segura, pues las condiciones son óptimas para la supervivencia de la especie.

En la Figura 11 se observa que las zonas con mayor probabilidad de presencia se encuentran localizadas en las áreas en que hay más ocurrencias de entrenamiento, que corresponden con áreas cercanas al mar o cercanas a cuencas de los ríos en el caso de las ramificaciones que se adentran hacia el interior.

En la siguiente tabla se expone el resultado de la validación de las ocurrencias de test sobre la distribución de probabilidad de presencia realizada con las ocurrencias de entrenamiento:

Probabilidad	Nº ocurrencias	Porcentaje
100 – 75 %	174	36%
75 – 50 %	172	35%
50 – 25%	75	15%
25 – 0%	68	14%

Tabla 6. En la primera columna se muestran diferentes intervalos de probabilidad de presencia. En la segunda columna se muestra el número de ocurrencias cuya probabilidad de presencia se encuentra en el intervalo de probabilidad anterior. En la última columna se expresa el porcentaje de las ocurrencias que se encuentran en qué intervalo de probabilidad.

Se puede comprobar que más de un 70 % de las ocurrencias se encuentran situadas en áreas donde la probabilidad de presencia es superior al 50%, y más de un 80 % se sitúa en zonas con probabilidades de presencia mayores al 25%.

Se presenta a continuación la curva ROC del modelo:

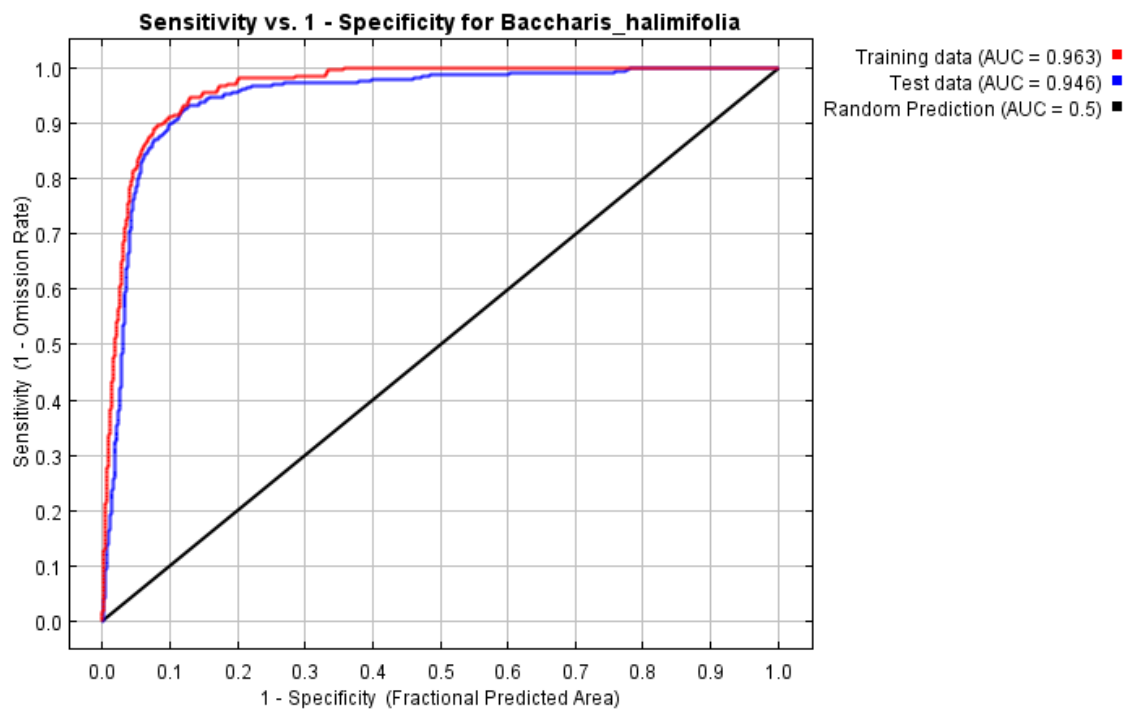


Figura 12. Curva ROC del modelo de validación. Se observa en la leyenda que la curva de los datos de test tiene un valor de AUC = 0.946.

Siguiendo los intervalos establecidos para interpretar las curvas ROC:

- [0.5]: Es como lanzar una moneda
- [0.5, 0.6): Test malo
- [0.6, 0.75): Test regular
- [0.75, 0.9): Test bueno
- [0.9, 0.97): Test muy bueno
- [0.97, 1): Test excelente

Se podría considerar un modelo muy bueno.

También se puede observar que algunas ocurrencias de color blanco, utilizadas como parte del entrenamiento, tienen probabilidad de presencia cercana a cero. Esto puede deberse a que muchas de las variables climáticas son muy diferentes a las relacionadas con la mayoría de las ocurrencias. En la mayoría de los casos se puede observar que se trata de ocurrencias cuyas coordenadas se encuentran en el interior, aisladas del resto, siendo muy pocas en comparación con el resto.

4.2. Predicción en escenario de cambio climático

El siguiente caso es el de un escenario de cambio climático en un futuro cercano. Las variaciones de las variables climáticas se han realizado con respecto al "Clima en España: Pasado, presente y futuro, elaborado por la Red CLIVAR-España" [58].

Se ha aumentado la temperatura un porcentaje en lugar de un valor fijo a cada punto del mapa para simular que, en las zonas con mayores temperaturas, estas aumentarán proporcionalmente más que las temperaturas de zonas más templadas y frías. Es el caso, por ejemplo, de las zonas cercanas a masas de agua, donde los cambios de temperatura se ven

atenuados por la gran capacidad calorífica del agua. Este porcentaje se ha obtenido a partir del aumento de temperatura predicho, para cada uno de los valores máximos de las variables de temperatura y obteniendo el aumento relativo. De esta manera, al escoger los valores máximos, se ha obtenido un mayor incremento relativo.

Las variaciones realizadas en las variables de temperatura y cambio climático han sido aproximadamente aquellas que se relacionan con un escenario de cambio climático B2, que corresponde con un escenario en que se toman medidas a nivel mundial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se promueve la sostenibilidad, el crecimiento de la población es moderado, hay mayor protección ambiental, y el desarrollo económico y los cambios tecnológicos son menos rápidos.

Las variaciones de las capas climáticas utilizadas se presentan en la siguiente Tabla:

Variables de temperatura	Variación	Variables de precipitación	Variación/ mm/día
Temperatura media anual	+ 9 %	Precipitación anual	- 0.2525
Mínima temperatura del mes más frío	+ 12 %	Precipitación en el trimestre más cálido	- 0.48
Máxima temperatura del mes más cálido	+ 12 %	Precipitación en el trimestre más frío	- 0.04
Temperatura media del trimestre más cálido	+ 12 %		
Temperatura media del trimestre más frío	+ 5 %		

Tabla 7. En la primera columna se muestran las variables climáticas de temperatura y en la siguiente las respectivas variaciones realizadas en las capas, en forma de porcentaje, en un escenario de cambio climático. En la tercera columna se presentan las variables climáticas de precipitación y, en la última columna, las respectivas variaciones.

En este modelo se han utilizado todas las ocurrencias que se utilizaron en el ajuste y validación, pero de manera conjunta, sin datos para realizar entrenamiento, pues ya se ha confirmado la validez del modelo en el caso anterior. Habiendo eliminado las ocurrencias con coordenadas duplicadas (pues se asume que se trata del mismo espécimen) y habiendo incluido las ocurrencias sin fechas, el número de ocurrencias es de 705.

En las siguientes imágenes se muestra la distribución de probabilidad obtenida en este caso, teniendo en cuenta las mismas capas ambientales en ambos casos, en el presente (Figura 13) y en el futuro, modificadas (Figura 14):

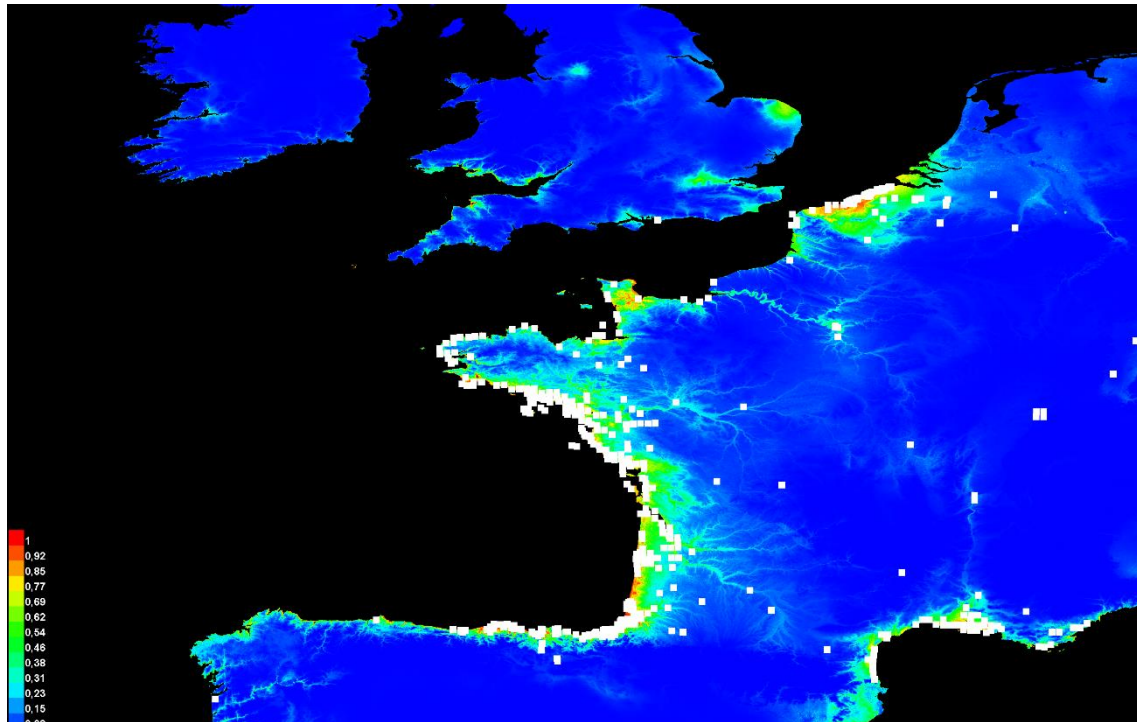


Figura 13. En la imagen superior se presenta la predicción de la distribución de probabilidad de presencia de la especie frente a un futuro en el que las variables climáticas no varían. Los puntos blancos son cada una de las ocurrencias. A la izquierda se encuentra la leyenda de colores indicando la probabilidad de presencia en cada punto.

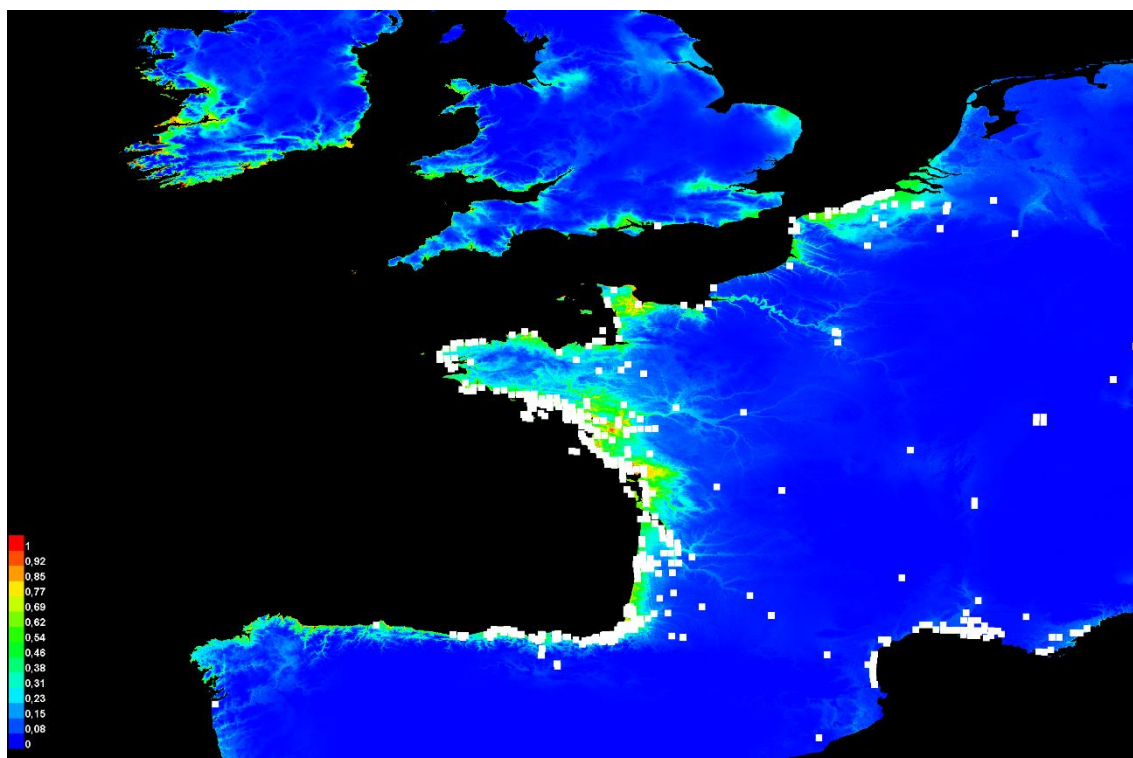


Figura 14. Se presenta la predicción de la distribución de probabilidad de presencia de la especie frente a un futuro en el que las variables climáticas varían en la situación de cambio climático actual, aproximadamente de cara al año 2100.

A primera vista se puede observar que, el efecto del calentamiento global del cambio climático simulado perjudicaría la presencia de *Baccharis halimifolia* en ciertos puntos de la costa cantábrica donde las condiciones ambientales actuales son más favorables para su presencia. Sin embargo, se puede observar que en zonas de la costa de Asturias y de Galicia, continúan existiendo puntos en que la probabilidad de presencia es mayor del 50 % (verde) e incluso algunas franjas con probabilidad mayor del 80 % (casi rojo). Por tanto, a pesar de que las condiciones son menos favorables, sigue habiendo una posibilidad considerable de expansión de esta especie hasta Galicia. De hecho, ya existe una ocurrencia en la costa oeste de Galicia.

Más al norte, en Francia, no variaría demasiado la distribución de probabilidad, pero sí se observa una cierta disminución de zonas óptimas (rojas), al igual que en zonas de Países Bajos y Dinamarca. No obstante, la situación cambia en Reino Unido, donde actualmente la probabilidad de presencia es relativamente baja, inferior al 60 % en prácticamente toda la zona salvo dos zonas de condiciones óptimas, muy localizadas. En un escenario de cambio climático, la probabilidad en esta zona aumenta de manera generalizada, sobre todo en las zonas donde ya existía una probabilidad de presencia considerable. Las zonas con condiciones óptimas con las condiciones actuales ya no tienen condiciones tan buenas, pero han aparecido varias zonas localizadas más al norte con condiciones óptimas para *Baccharis halimifolia*.

5. Discusión y conclusión

Los resultados obtenidos en la validación indican que se trata de una predicción muy buena, obteniendo un valor de AUC = 0.946, y teniendo más de un 50 % de los datos de test en zonas con probabilidad de presencia de más del 50%. Por tanto, el modelo sobre el escenario de cambio climático debería ser bastante acertado, si las condiciones de cambio climático simuladas son precisas.

Como se puede observar en la *Figura 14*, la predicción de la distribución de probabilidad de presencia de la especie muestra un descenso generalizado de la probabilidad en prácticamente toda Europa menos Reino Unido, donde se observa que en general la probabilidad de presencia de bastantes zonas cercanas a la costa aumenta. Sin embargo, este descenso generalizado no resulta tan abrupto como para que pueda dejar de expandirse por el territorio. Se debe tener en cuenta que las especies invasoras suelen serlo por tener una capacidad de adaptabilidad bastante alta en comparación con las especies autóctonas. De esta manera no se debe descartar la posibilidad de que en las áreas de las distribuciones de probabilidad en las que la probabilidad es menor que un 20% o 10% pueda haber o haya algún espécimen de *Baccharis halimifolia*. El territorio que más interesa por razones de proximidad es la costa cantábrica. A pesar de que las condiciones ambientales en el futuro para la especie se predicen peores que las actuales, sigue habiendo riesgo de expansión por toda la costa cantábrica pasando por Asturias y llegando hasta Galicia. Se ha hecho una importante referencia a una ocurrencia detectada en Galicia, por lo que es posible que haya más.

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones en este trabajo, los estudios sobre biodiversidad tienen el inconveniente de no poder tener todos los datos de referencias que serían deseables, por lo que se pierde información por todas las especies que existen, pero no se han documentado. Es posible que haciendo uso de las *Essential biodiversity variables* se podría lograr una mejor predicción, ya que se utilizarían datos relacionados con la composición genética, las poblaciones de la especie, los rasgos de la especie, la composición de la comunidad, el funcionamiento del ecosistema y su estructura [59]. Sin embargo, se tratan de datos difíciles de obtener y, sobre todo, difíciles de parametrizar en un modelo predictivo. También se podría mejorar el modelo con datos climáticos más exactos, debido a que los de la base de datos de WorldClim BIO son los valores medios desde el año 1970 hasta el año 2000. De esta manera, la relación entre las ocurrencias (y las fechas en que fueron registradas) y los valores climáticos podrían ser más precisos. En el caso de los índices de satélite, se ha tenido que coger un intervalo de tiempo de más de un año para que no hubiera ninguna zona sin parches (zonas sin datos), por lo que, en una misma capa, los índices podrían tener valores bastante diferentes dependiendo de la estación del año que fuera.

Finalmente, a pesar de que los resultados de la distribución de probabilidad de presencia de esta especie de cara a un cambio climático no parezcan muy favorecedores para esta, no debe ser motivo de despreocupación. Se trata de una predicción en un futuro dentro de 50-80 años. A lo largo de ese tiempo la especie se puede adaptar si el cambio no es brusco y puede afectar a los ecosistemas que habita, perjudicando y dañando a las especies autóctonas.

Por tanto, se debe tener en cuenta que las zonas en las que actualmente hay especímenes de *Baccharis halimifolia*, deben ser estudiadas para localizar ocurrencias que no se hubieran detectado, actuar contra estas especies para evitar su expansión y, sobre todo, prevenir en las zonas potencialmente afectadas como es el caso de la costa sur de Reino Unido.

En este caso se tiene una gran barrera natural, el mar. No obstante, existen bastantes vías de entrada de esta especie, ya sea en forma de la propia planta con cierta madurez, como en forma de semilla, a través de vía aérea, marítima, ferroviaria y terrestre (bajo el Canal de la Mancha). En el caso de la Península Ibérica, en Asturias y Galicia se deberían tomar medidas de prevención y de análisis de las zonas con probabilidad de presencia media-alta para localizar especímenes y erradicarlos. Mientras que en Cantabria y País Vasco se debería continuar con las medidas de erradicación de la especie para también así evitar su expansión en épocas de reproducción.

Referencias

- [1] *Biodiversidad: ¿qué es, dónde se encuentra y por qué es importante?* Ecologistas en acción, 2006. [consulta 09-06-2019]. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/6296/biodiversidad-que-es-donde-se-encuentra-y-por-que-es-importante/>
- [2] *UN Report: Nature's Dangerous Decline 'Unprecedented'; Species Extinction Rates 'Accelerating'*. Sustainable Development Goals, UN. 2019. [consulta 09-06-2019]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2019/05/nature-decline-unprecedented-report/>
- [3] Diccionario de la lengua española. *Biodiversidad*. RAE. [consulta 09-06-2019]. Disponible en: <https://dle.rae.es/?id=5YDRbFC>
- [4] M. Duarte, Carlos et al. *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. CSIC. Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A., 2006. ISBN: 978-84-00-08452-3.
- [5] Diccionario de la lengua española. *Física*. RAE. [consulta 09-06-2019]. Disponible en: <https://dle.rae.es/?id=Hzx5KSB>
- [6] Diario oficial de la Unión Europea. DECISIÓN DE EJECUCIÓN (UE) 2017/499 DE LA COMISIÓN de 17 de marzo de 2017 relativa a la creación de la Infraestructura Virtual Europea de Ciencia y Tecnología para la Investigación sobre la Biodiversidad y los Ecosistemas — Consorcio de Infraestructuras de Investigación Europeas (LifeWatch ERIC). [notificada con el número C (2017) 1648]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/red-parques-nacionales/novedades/lifewatch_tcm30-379395.pdf
- [7] Lifewatch ERIC. Spain. 2018. [consulta 10-06-2019]. Disponible en: <https://www.lifewatch.eu/spain>
- [8] Objetivos de Desarrollo Sostenible. UN. [consulta 30-08-2019]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [9] Objetivos de Desarrollo Sostenible. UN. *Objetivo 15: Vida de los ecosistemas terrestres. Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad*. [consulta 30-08-2019]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>
- [10] Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad
- [11] Top 20 Las 20 especies exóticas invasoras más dañinas presentes en España. 2006. GEIB, Grupo Especialista en Invasiones Biológicas. Edición patrocinada por la Fundación Territori i Paisatge de Caixa Catalunya. Serie Técnica N.2.
- [12] *Especies invasoras: La globalización ha llegado al mundo natural*. WWF. [consulta 05-07-2019]. Disponible en: https://www.wwf.es/nuestro_trabajo_/especies_y_habitats/especies_invasoras/
- [13] *Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras*. Ministerio para la transición ecológica. Gobierno de España. [consulta 08-07-2019]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-especies/especies-exoticas-invasoras/ce-eei-catalogo.aspx>

- [14] *Lista de especies exóticas preocupantes para la Unión Europea*. Ministerio para la transición ecológica. Gobierno de España. [consulta 08-07-2019]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-especies/especies-exoticas-invasoras/ce-eei-lista-UE.aspx>
- [15] Fried, Guillaume & Caño, Lidia & Brunel, Sarah & Beteta, Estela & Charpentier, Anne & Herrera, Mercedes & Starfinger, Uwe & Panetta, F.. (2016). Monographs on Invasive Plants in Europe: *Baccharis halimifolia* L.. Acta botanica Gallica: bulletin de la Société botanique de France. 163. 1-27. 10.1080/23818107.2016.1168315
- [16] Diccionario de la lengua española. *Palatabilidad*. RAE. [consulta 12-06-2019]. Disponible en: <https://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=palatabilidad>
- [17] ARISTIZÁBAL GUTIÉRREZ, Fabio Ancízar; CERÓN RINCÓN, Laura Emilia. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. Revista Colombiana de Biotecnología, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 285-295, ene. 2012. ISSN 1909-8758. [consulta 06-08-2019]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/32889/38347>
- [18] EPPO (2013) *Pest risk analysis for Baccharis halimifolia*. EPPO, Paris. [consulta 12-08-2019]. Disponible en: http://www.eppo.int/QUARANTINE/Pest_Risk_Analysis/PRA_intro.htm
- [19] SCHOWENGERDT, R. 2011. *Remote sensing*. Amsterdam [etc.]: Elsevier. Hardcover ISBN: 9780123694072
- [20] *Sentinel – 2. Missions*. ESA, Sentinel online. [consulta 20-06-2019] Disponible en: <https://earth.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- [21] *Overview*. Copernicus. Observing the Earth. ESA. [consulta 20-06-2019] Disponible en: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3
- [23] *Facts and Figures*. Sentinel 2. ESA. [consulta 20-06-2019] Disponible en: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Facts_and_figures
- [24] *MultiSpectral Instrument (MSI) Overview*. ESA. Sentinel online. [consulta 20-06-2019] Disponible en: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>
- [25] *Sentinel-2A Launches—Our Compliments & Our Complements. Comparison of Landsat 7 and 8 bands with Sentinel 2*. NASA. Landsat science. [consulta 22-06-2019]. Disponible en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/sentinel-2A-launches-our-compliments-our-complements/>
- [26] *Instrument*. Sentinel 2. ESA. [consulta 22-06-2019]. Disponible en: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Instrument
- [27] *Overview*. ESA. Sentinel online. [consulta 22-06-2019]. Disponible en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>
- [28] *MultiSpectral Instrument (MSI)*. ESA. Sentinel online. [consulta 22-06-2019]. Disponible en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload>
- [29] *What is GBIF?* GBIF. Global Biodiversity Information Facility. [consulta 10-06-2019] <https://www.gbif.org/what-is-gbif>

- [30] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*.
- [31] QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio. QGIS. [consulta 11-08-2019]. Disponible en: <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>
- [32] Maxent software for modeling species niches and distributions. Maxent. [consulta 06-07-2019]. Disponible en: https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/
- [33] Steven J. Phillips, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire. [Internet] Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). [consulta 17-07-2019] Disponible en: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/
- [34] Steven J. Phillips, Robert P. Anderson, Robert E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190:231-259, 2006
- [35] Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- [36] Vilà M, Gassó N, Thuiller W, Pino J (2012) Potential distribution range of invasive plant species in Spain. *NeoBiota* 12: 25-40. Disponible en: <https://doi.org/10.3897/neobiota.12.2341>
- [37] Calibration. ESA. Sentinel online. [consulta 09-09-2019]. Disponible en: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/calibration>
- [38] GTOPO30 DEM courtesy of the U.S. Geological Survey
- [39] Bosque Sendra, J.; 2000. *Sistemas de Información Geográfica* Ed. Rialp, Madrid, 451 pp.
- [40] Nualart N (2018). Institut Botanic de Barcelona (IBB-CSIC-ICUB), BC-Plantae. Botanical Institute of Barcelona (IBB-CSIC-ICUB). Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/pff0t6> accessed via GBIF.org on 2019-09-08.
- [41] CSIC-Real Jardín Botánico (2019). CSIC-Real Jardín Botánico-Colección de Plantas Vasculares (MA). Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/mug7kr> accessed via GBIF.org on 2019-09-08.
- [42] Gitelson, A., M. Merzlyak, and O. Chivkunova. "Optical Properties and Nondestructive Estimation of Anthocyanin Content in Plant Leaves." *Photochemistry and Photobiology* 71 (2001): 38-45.
- [43] Indices. Sentinel 2 EO products. Sentinel Hub by SINERGISE. [consulta 05-07-2019]. Disponible en: https://www.sentinel-hub.com/develop/documentation/eo_products/Sentinel2EOproducts
- [44] Martín, M. *Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Iberica a partir de imágenes NOAA AVHRR*. Doctoral thesis, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares (1998)
- [45] Paweł Hawryło, Bartłomiej Bednarz, Piotr Wężyk & Marta Szostak (2018) Estimating defoliation of Scots pine stands using machine learning methods and vegetation indices of Sentinel-2, *European Journal of Remote Sensing*, 51:1, 194-204, DOI:10.1080/22797254.2017.1417745

- [46] *Sentinel band combination and indices*. Repositorio de Github. [consulta 05-07-2019]. Disponible en: <https://gist.github.com/seilanhiep/7e6c09cc20e1d3707ed16048406f9d8e>
- [47] P. Arellano, K. Tansey, H. Balzter, D.S. Boyd. *Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images*. Environmental Pollution. Volume 205, October 2015, Pages 225-239. Pollut. 205 (2015) 225.
- [48] Wang, Z.; Liu, J.; Li, J.; Zhang, D.D. Multi-Spectral Water Index (MuWI): A Native 10-m Multi-Spectral Water Index for Accurate Water Mapping on Sentinel-2. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 1643. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.05.041>
- [49] Das, Bappa & Sahoo, Rabi & Pargal, Sourabh & Krishna, Gopal & Verma, Rupali & TIWARI, R. & Chinnusamy, Viswanathan & Sehgal, Vinay & GUPTA, V.K.. (2015). Spectral Based Non-Invasive Estimation of Plant Chlorophyll Content. *Journal of Agricultural Physics*. 15. 88-102.
- [50] Yantao XI, Nguyen Xuan Thinh & Cheng LI (2019) Preliminary comparative assessment of various spectral indices for built-up land derived from Landsat-8 OLI and Sentinel-2A MSI imageries, *European Journal of Remote Sensing*, 52:1, 240-252, DOI: 10.1080/22797254.2019.1584737
- [51] Viña, A.; Gitelson, A.A. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. *Geophys. Res. Lett.* 2005, 32,195-221.
- [52] BRONSON, Kevin F., et al. Active optical sensors in irrigated durum wheat: Nitrogen and water effects. *Agronomy Journal*, 2017, vol. 109, no 3, p. 1060-1071.
- [53] A. Gitelson, M.N. Merzlyak. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, 22 (1994), pp. 247-252
- [54] Chen, Jan-Chang & Yang, C.-M & Wu, Shou-Tsung & Chung, Y.-L & Charles, Albert Linton & Chen, Chaur-Tzuhn. (2007). Leaf chlorophyll content and surface spectral reflectance of tree species along a terrain gradient in Taiwan's Kenting National Park. 48. 71-77.
- [55] *Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A*. Earth Engine Data Catalog. [consulta 08-07-2019]. Disponible en: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR
- [56] Feng, Min, Joseph O. Sexton, Saurabh Channan, and John R. Townshend. 2015. A Global, High-Resolution (30-M) Inland Water Body Dataset for 2000: First Results of a Topographic-Spectral Classification Algorithm. *International Journal of Digital Earth*. doi:10.1080/17538947.2015.1026420.
- [57] *Baccharis halimifolia* .L. BACHAL/EEI/FL015L. CATÁLOGO ESPAÑOL DE ESPECIES EXÓTICAS INVASORAS. [consulta 16-06-2019]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-especies/baccharis_halimifolia_2013_tcm30-69813.pdf
- [58] Bladé Ileana, Cacho Isabel et al. *Clima en España: Pasado, presente y futuro Informe de Evaluación del Cambio Climático Regional*. Red Temática CLIVAR- España. 2010. Editores: Fiz F. Pérez y Roberta Boscolo. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/23600>
- [59] *What are EBVs? Essential Biodiversity Variables*. GEO Group on Earth Observations. [consulta 25-06-2019]. Disponible en: <https://geobon.org/ebvs/what-are-ebvs/>

- [60] Jaynes, E.T., 1957. Information theory and statistical mechanics. *Phys. Rev.* 106, 620–630.
- [61] Ligrone, Roberto (2019). "Glossary". *Biological Innovations that Built the World: A Four-billion-year Journey through Life & Earth History*. Entropy. Springer. p. 478. ISBN 3030160564. Retrieved 29 August 2019.
- [62] Shannon, C.E., 1948. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.* 27, 379–423, 623–656.
- [63] Level – 2. ESA. Sentinel online. [consulta 08-09-2019]. Disponible en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>
- [64] Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: collected papers; Swets, 1996
- [65] Bedia, Joaquín; Herrera, Sixto; Gutiérrez, José Manuel. 2013. *Dangers of using global bioclimatic datasets for ecological niche modeling. Limitations for future climate projections*. Global and Planetary Change. Volume 107.
- [66] Wagner GJ. *Cellular and Subcellular Location in Plant Metabolism*. 1982. Creazy L, Hrazdina G. (ed) Recent advances in Phytochemistry. New York, Plenum Press. 1-45
- [67] Cerda, J y Cifuentes, L. *Uso de curvas ROC en investigación clínica. Aspectos teórico-prácticos*. Revista chilena de infectología. Abr. 2012. vol.29 nº 2. 138-141. Santiago. ISSN 0716-1018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182012000200003>
- [68] Ordóñez, L. *El desarrollo tecnológico en la historia*. 2007.
- [69] Campos, J.A., Caño L, Herrera M. *La invasión de Baccharis halimifolia en la costa cantábrica*. Ambianta. 2014. Nº 109. 78 – 91. ISSN: 1577-9491. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_AM%5Cpdf_AM_Ambienta_2014_109_completa.pdf

Apéndices

Apéndice 1

En este apéndice se expone un fragmento del *script* del código utilizado en la herramienta *Google Earth Engine* con el objetivo de obtener un índice en concreto, el NDVI. Se han usado códigos similares para obtener las imágenes para cada índice, así como para cada variable climática y la elevación, variando en cada caso algunas líneas de código.

```
//Se crea un rectángulo en el mapa encerrando la región de interés.
//Este código se genera de manera automática una vez se dibuja la
//región en el mapa.

var geometry =

  ee.Geometry.Polygon(
    [[[-9.540027978347439, 43.90454413750855],
      [-9.540027978347439, 41.02003125913957],
      [3.566661474777561, 41.02003125913957],
      [3.566661474777561, 43.90454413750855]]], null, false);

//A continuación se selecciona el satélite que se va a utilizar, es
//decir, se selecciona la base de datos asociada a este satélite.
//También se realiza un filtrado por la zona seleccionada, por fechas
//y por porcentaje de nubes en la imagen.

var image=ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2').filterBounds(geometry)
.filterDate('2017-06-01', '2017-09-
01').filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'less_than', 3);

//Se realiza una composición de todas las imágenes que se observan en
//el mapa para obtener una única imagen. Esto es debido a que el
//satélite, para barrer toda la zona, tarda varios días. Teniendo en
//cuenta que se toma una imagen al día a una hora determinada, se crea
//una sola imagen con partes de cada una, eso es, un mosaico.
var mosaic=image.mosaic();

//Para ver la imagen se centra en un punto dentro de la región
//seleccionada.
Map.setCenter(-3.9239421666125054,42.24682307617849, 7);

//Se crea una función cuyo parámetro es una imagen realizando una
//operación matemática con ciertas bandas del satélite, siguiendo con
//la operación entre bandas descrita en la Tabla 2. El resultado
//también será una imagen.
var NDVI = function(image) {
  return ee.Image(0).expression(
    '(eight - four) / (eight + four)',
    {
      'four': image.select('B4'),
      'eight': image.select('B8'),
    });
};
```

```

};

//Se usa la función poniendo como variable la imagen "mosaic"
//anteriormente formada.
var ndvi=NDVI(mosaic);

//Se añade la capa para poder visualizarla en el mapa. Este paso no es
//necesario pero conviene realizarlo para observar la imagen
//resultante antes de descargarla.
Map.addLayer(ndvi, {}, 'NDVI')

//Por último se realiza la exportación de la imagen seleccionando la
//imagen anterior, escogiendo el nombre que va a tener el archivo, la
//escala, en este caso, 100 m/px, la región que se seleccionó al
//principio, el formato del archivo que es Geotiff con extensión .tif,
//y la carpeta de Google Drive en la que se quiere guardar el archivo.
Export.image.toDrive({
  image:rendwi,
  description:'RENDWI',
  scale:100,
  region:geometry,
  fileFormat: 'GeoTIFF',
  formatOptions: {
    cloudOptimized: true
  },
  folder: 'EarthEngineDescargas'
});

```